

Das Fahrplanungsproblem der Verkehrsbetriebe - Ein Beitrag zur Theorie des Verkehrsbetriebes

Dissertation
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Wirtschaftswissenschaft
der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Justus Liebig-Universität in Gießen

vorgelegt von
Bernd Thymm
aus Leipzig

Gießen

1969

Das Fahrplanungsproblem der Verkehrsbetriebe **- Ein Beitrag zur Theorie des Verkehrsbetriebes**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Wirtschaftswissenschaft
der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät
der Justus Liebig-Universität in Gießen

vorgelegt von
Bernd Thymm
aus Leipzig

Gießen

1969



Erstgutachter:

Professor Dr. Karl Alewell

Zweitgutachter:

Professor Dr. Dietger Hahn

Tag der mündlichen Prüfung: 11. 7. 1969

Inhaltsverzeichnis

Seite

Problemstellung	9
Teil 1	
Abgrenzung und Analyse des Fahrplanungsproblems	11
A Grundbegriffe der Untersuchung	12
I Die planenden Institutionen:	
Die Verkehrsbetriebe	12
II Das Planungsergebnis: Der Fahrplan	18
III Die Planungstätigkeit: Planung als Entscheidungsprozeß	24
B Abgrenzung und Strukturierung des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung	28
I Überblick	28
II Die Aktionsparameter	31
1) Fahrzeugzuordnungen	31
2) Transportobjektzuordnungen	34
3) Fahrpersonalzuordnungen	35
III Die Daten	38
1) Sachliche und personelle Produktionsmittel	38
a) Fahrzeuge	38
b) Stationen	41
c) Depots	43
11) Fahrzeugdepots	43
22) Fahrpersonaldepots	45
d) Wege	47
e) Fahrpersonal	50
2) Nachfragedaten	51
a) Struktur der Nachfrage	51
b) Bestimmungsfaktoren der Nachfrage	53
C Die Fahrplanung als Ablaufplanung im Bereich der Leistungserstellung des Verkehrsbetriebes	57
I Einordnung der Fahrplanung in die betriebliche Gesamtplanung	57
II Zur Frage der Anwendbarkeit von Planungsmodellen aus der Industrie	60

	Seite
D Zielanalyse	64
I Der formale Aufbau eines Zielsystems	64
II Oberziele von Verkehrsbetrieben	68
1) Das Gewinnziel als Ziel privater und öffentlicher Verkehrsbetriebe	68
2) Das Gemeinwirtschaftlichkeitsziel öffentlicher Verkehrsbetriebe	72
III Ableitung eines repräsentativen Fahrpla- nungsziels privater und öffentlicher Verkehrsbetriebe	77
1) Darstellung und Kritik der in der Fachliteratur genannten Fahrpla- nungsziele	77
a) Vorbemerkung	77
b) Pünktlichkeit	78
c) Sicherheit	78
d) Befriedigung der Verkehrsbedürf- nisse	79
e) Wirtschaftlichkeit	81
f) Hohe Ausnutzung der technischen Leistungsfähigkeit der Anlagen und Fahrzeuge	82
2) Gewinnmaximierung mit Nebenbedingungen als Fahrplanungsziel	83
a) Erläuterungen zur Gewinnmaximierung	83
11) Ableitung	83
22) Gewinneinflußgrößen	86
b) Erläuterungen zu den Zielneben- bedingungen	90
E Die Grenzen der generellen Betrachtungsweise des Fahrplanungsproblems	94

	Seite
Teil 2	
Synthese mit Modellen	98
A Überblick über die Synthese mit Modellen	99
I Anforderungen an die Modelle:	
Isomorphie und Lösbarkeit	99
II Der Aufbau der Modelldarstellung	102
B Fahrplanungsmodelle in der Literatur zur Unternehmensforschung - Betonung der ört- lichen Zuordnung	105
I Die Interpretation des Fahrplanungspro- blems als Zuordnungsproblem	105
1) Kennzeichnung der Struktur von Zuordnungsproblemen	105
a) Begriff	105
b) Allgemeine Kennzeichnung	107
c) Kennzeichnung der Sonderfälle	109
2) Verkehrsbetriebliche Zuordnungs- modelle mit mangelnder Isomorphie zum Fahrplanungsproblem	111
a) Vorbemerkung	111
b) Modelle mit der Struktur des Ernennungsproblems	112
c) Modelle mit der Struktur des Transportproblems	113
11) Modelle mit örtlichen Zuordnungen	113
22) Modelle mit Zuordnungen zu Kombinationen von Zeit und Ort	116
33) Modelle mit festgelegter Nutz- fahrt - Leerfahrt Abfolge	120
44) Zusammenfassung	122
d) Modelle mit der Struktur des all- gemeinen linearen Zuordnungspro- blems	123

	Seite
3) Modelle mit ausreichender Isomorphie zum Fahrplanungsproblem	126
a) Vorbemerkung	126
b) Fahrplanungsmodelle mit nachträglich zu verknüpfenden Nutzfahrten	127
c) Fahrplanungsmodelle mit vorher zu verknüpfenden Nutzfahrten	129
II Die Interpretation des Fahrplanungsproblems als kombinatorisches Problem	134
1) Kennzeichnung der Struktur kombinatorischer Probleme	134
2) Aus Zuordnungsmodellen entwickelte kombinatorische Fahrplanungsmodelle	137
3) Aus dem travelling salesman-Problem entwickelte kombinatorische Fahrplanungsmodelle	144
a) Begrenzte Isomorphie des travelling salesman-Problems zum Fahrplanungsproblem	144
b) Erweitertes travelling salesman-Problem als Grundlage für Fahrplanungsmodelle	149
11) Modelle ohne Zeitgrenzen für die Aufträge	149
22) Modelle mit Zeitgrenzen für die Aufträge	153
III Fahrplanungsprobleme in der Form von Simulationsmodellen	157
1) Kennzeichnung der Struktur von Simulationsmodellen	157
2) Beispiel für die Simulation eines Fahrplanungsproblems	159
a) Darstellung des Beispiels	159
b) Kritische Würdigung	166

	Seite
C Fahrplanung als dynamisches Entscheidungsproblem	
- Betonung der zeitlichen Zuordnung	169
I Einführung in das Problem	169
1) Alternativenabfolgen	169
2) Dynamische Programmierung	172
II Grundmodell	175
1) Modellaufbau	175
2) Lösungsgang	180
III Möglichkeiten und Grenzen der Erweiterung des Grundmodells	185
1) Grundsätzliche Grenzen der Problemzerlegung mit der dynamischen Programmierung	185
2) Quantitative Modellerweiterungen	188
a) Überblick	188
b) Der Problemumfang bei verschiedenartigen Fahrzeugen in einem vollständig verbun- denen Netz	189
c) Der Problemumfang bei gleichartigen Fahrzeugen in einem vollständig ver- bundenen Netz	192
d) Der Problemumfang bei gleichartigen Fahrzeugen in unvollständig verbundenen Netzen und in unverbundenen Teilnetzen	199
11) Der Problemumfang bei unvollständig verbundenen Netzen	199
22) Der Problemumfang und die optimale Fahrzeugaufteilung bei unverbun- denen Teilnetzen	201
e) Zusammenfassung	205
3) Qualitative Modellerweiterungen	206
a) Berücksichtigung der losen Koppelung	206
b) Berücksichtigung von Kapazitätsgrenzen	212

	Seite
11) Überblick	212
22) Fahrzeugdaten	214
33) Daten durch ortsfeste Anlagen	217
44) Fahrpersonaldaten	217
55) Zusammenfassung	218
c) Berücksichtigung von Zielnebenbedingungen	219
D Zusammenfassende Beurteilung der Modelle	220
Literaturverzeichnis	223
Lebenslauf	233

Problemstellung

Die Verkehrsbetriebslehre steht erst am Anfang einer Entwicklung, die sich in der bisher weitgehend am Industriebetrieb orientierten Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre bereits vollzogen hat. Gemeint ist die Entwicklung zu einer systematischen Theorie des Betriebes, auf deren Grundlage die betriebswirtschaftliche Forschung aufbauen kann und konkrete Probleme gelöst werden können.

Die Verkehrsbetriebslehre lehnt sich demgegenüber noch stark an benachbarte Disziplinen wie Verkehrswissenschaft und Verkehrstechnik an. So ist einerseits die Tendenz zur volkswirtschaftlich orientierten Globalbetrachtung zu beobachten, andererseits wird eine an technischen Eigenschaften der Verkehrsmittel orientierte Detailbetrachtung, die die getrennte Untersuchung der Verkehrszweige erfordert, durchgeführt.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zu einer Theorie des Verkehrsbetriebes¹⁾ leisten. Untersucht werden soll das Fahrplanungsproblem, ein besonders typisches Problem von Verkehrsbetrieben.

Dabei ist sowohl die volkswirtschaftlich-globale, als auch die technisch-detaillierte Betrachtungsweise zu vermeiden, damit der einzelwirtschaftliche Aspekt und die für alle Verkehrsbetriebe gültige Struktur des Problems deutlich werden.

1) "Die Verkehrsbetriebslehre als Teil der Betriebswirtschaftslehre darf sich ... nicht darin erschöpfen, lediglich von Fall zu Fall Stellung zu Tagesereignissen zu beziehen; sie muß vielmehr auch zu einer Theorie des Verkehrsbetriebes als einer gesicherten Grundlage jeder Behandlung verkehrsbetrieblicher Fragen führen." Diederich, H., Zur Theorie des Verkehrsbetriebes, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 36. Jg. (1966), Ergänzungsheft 1, S. 37

Im Teil 1 der Arbeit wird das Fahrplanungsproblem aus der empirischen Vielfalt durch Abstraktion hervorgehoben. Es wird ein Begriffssystem für die Erfassung von Fahrplanungsproblemen entwickelt und ein allgemeingültiges Unterziel für die Fahrplanung sowohl der privaten als auch der öffentlichen Verkehrsbetriebe abgeleitet. Die Analyse der Elemente des abgegrenzten Problems soll zugleich die Problemstruktur verdeutlichen.

Im Teil 2 soll mit Hilfe von Modellen eine Synthese von Problemelementen versucht werden. Die Modellbetrachtungen dienen einerseits einem vertieften Einblick in die Problemstruktur, zum anderen kann zugleich überprüft werden, wie weit das Fahrplanungsproblem mit den zur Verfügung stehenden Planungsmitteln systematisch gelöst werden kann.

Teil 1

Abgrenzung und Analyse des Fahrplanungsproblems

A. Grundbegriffe der Untersuchung

I. Die planenden Institutionen:

Die Verkehrsbetriebe

Um das Fahrplanungsproblem der Verkehrsbetriebe gegen ähnliche Probleme in anderen Betrieben abzugrenzen, soll der Verkehrsbetrieb näher gekennzeichnet werden. Dies geschieht am besten in einer Auseinandersetzung mit den in der Verkehrsliteratur angeführten Verkehrsbetriebsbegriffen.

Der am häufigsten gebrauchte Verkehrsbetriebsbegriff ist gleichzeitig derjenige mit dem größten Begriffsumfang. Verkehrsbetriebe sind demnach solche Betriebe, deren Hauptaufgabe die Ortsveränderung von Personen, Sachen und Nachrichten ist und die Betriebe, die indirekt zur Ortsveränderung beitragen.¹⁾ Die indirekt zur Ortsveränderung beitragenden Betriebe sind Hilfsbetriebe des Verkehrs, die Wege, Stationen, Lagereien, Speditionen und Verkehrsvermittlungen betreiben.

1) vgl. Illetschko, L.L., Transportbetriebswirtschaftslehre, Wien, New York 1966, S. 3 ff.; Illetschko, L.L., Verkehrsbetriebe, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Band 11, Stuttgart, Tübingen, Göttingen 1961, S.111; Lechner, K., Verkehrsbetriebslehre, Stuttgart 1963, S.9; Schwarz, H., Verkehrsbetriebslehre, in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Band 4, 2.Aufl., Stuttgart, 1962, Sp. 5733 ff.; Einen ähnlichen Begriff verwendet auch die amtliche Statistik der Bundesrepublik Deutschland. Vgl. Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland 1966, S. 352: "Verkehrsunternehmen sind rechtlich selbständige Unternehmen, deren wirtschaftlicher Schwerpunkt im Bereich der Wirtschaftsabteilung Verkehr und Nachrichtenübermittlung ... liegt."

Dieser Begriff schließt Betriebe aus, bei denen Ortsveränderungen und Hilfsaufgaben für die Ortsveränderungen nicht den Schwerpunkt der betrieblichen Tätigkeit bilden. Ausgeschlossen sind also der von Industrie- oder Handelsbetrieben durchgeführte Verkehr innerhalb einer Arbeitsstätte (innerbetrieblicher Verkehr) sowie der Verkehr zwischen Arbeitsstätten eines Unternehmens oder zwischen Arbeitsstätten und Abnehmern (Werkverkehr). Innerbetrieblicher Verkehr und Werkverkehr werden meist mit eigenen Fahrzeugen an eigenen Transportobjekten ausgeführt, Verkehrsbetriebe befördern dagegen mit eigenen Fahrzeugen vorwiegend fremde Transportobjekte.

Die Einbeziehung der Hilfsbetriebe des Verkehrs in den Begriff "Verkehrsbetrieb" erscheint unzweckmäßig, da die Hilfsbetriebe eine andere Leistung erbringen und einen anderen Leistungsprozeß durchführen als die Betriebe, die Ortsveränderungen an Transportobjekten vornehmen. Leistung und Leistungsprozeß der beiden Betriebsarten sind so offensichtlich verschieden, daß sich die Zusammenfassung in einen Begriff nur unter dem Gesichtspunkt des gemeinsamen Wirkens an einer volkswirtschaftlich definierten Verkehrsaufgabe rechtfertigen läßt. Vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt gesehen, sollten die Hilfsbetriebe des Verkehrs nicht in den Verkehrsbetriebsbegriff einbezogen werden. Unter Verkehrsbetrieben sind nach dieser Einschränkung also nur Betriebe zu verstehen, deren Hauptaufgabe die Beförderung von Gütern, Personen und Nachrichten ist¹⁾.

1) vgl. zu diesem Begriffsumfang, Nowak, P., Modellanalyse der verkehrsbetrieblichen Investitionsrechnung, Diss. Hamburg 1966, S. 25 f.

Im Nachrichtenverkehr werden Informationen, also immaterielle Transportobjekte, befördert. Er umfaßt so verschiedene Bereiche wie den Briefverkehr, den Telefon- und Telegrammverkehr sowie Sendungen der Massenkommunikationsmittel Rundfunk und Fernsehen.¹⁾ Die Besonderheiten der immateriellen Transportobjekte bedingen eine Reihe von Unterschieden zum Personen- und Güterverkehr, die die gesonderte Betrachtung des Nachrichtenverkehrs nahelegen.

Werden die Informationen auf materiellen Nachrichtenträgern verzeichnet, wird die Beförderung der Nachrichtenträger meist von Güterverkehrsbetrieben übernommen. So werden Briefe beispielsweise von der Bundesbahn oder der Lufthansa befördert. Die Bundespost ist in diesen Fällen Auftraggeber der Verkehrsbetriebe. Sie übernimmt insofern nicht die eigentliche Verkehrsleistung, sondern hat lediglich eine Vermittlerrolle zwischen Absender und Adressat der Informationen.

Die Beförderung von Informationen im Telefon- und Telegrammverkehr erfolgt mit technischen Prozessen, die grundlegend von den Beförderungsprozessen für materielle Transportobjekte abweichen. Die besonderen technischen Prozesse, wie die Übertragung von Informationen mittels elektrischer Leitungen oder mittels Funk, bedingen auch unterschiedliche wirtschaftliche Probleme, die nicht mit den Problemen des Güter- und Personenverkehrs übereinstimmen.

1) vgl. Voigt, F., Verkehr, 2. Band, 2. Hälfte, Die Entwicklung des Verkehrssystems, Berlin 1965, S. 807 - 940;
Spranger, P.-H., Theorie des Nachrichtenverkehrs, Berlin 1961, S. 8 und S. 61

Bei den Massenkommunikationsbetrieben kann man schließlich nicht mehr von Betrieben sprechen, deren Hauptaufgabe die Ortsveränderung von Transportobjekten ist, da andere Aufgaben wie z.B. die Produktion von Sendungen viel stärker in den Vordergrund treten.

Da die besonderen Leistungen und Leistungsprozesse des Nachrichtenverkehrs eine gesonderte Untersuchung erfordern,¹⁾ ist es unzweckmäßig, die Betriebe, die sich mit Nachrichtenverkehr befassen, in den dieser Arbeit zugrundegelegenden Verkehrsbetriebsbegriff einzubeziehen.

Diederich und Bendixen schlagen neben der gesonderten Behandlung des Nachrichtenverkehrs außerdem eine Trennung von Güter- und Personenverkehrsbetrieben vor.²⁾ Ebenso wie Industriebetriebe arbeiteten die Güterverkehrsbetriebe an Sachgegenständen: während Industriebetriebe sachliche Veränderungen vornahmen, führten die Verkehrsbetriebe örtliche Veränderungen durch. Gemeinsam sei beiden Betriebsklassen, daß sie konsumferne Güter dem Konsum näher brächten.³⁾ Wegen dieser Tatsache seien zwischen Güter- und Personenverkehr größere Unterschiede als zwischen Güterverkehr und industrieller Erzeugung festzustellen. Zudem seien technisch und wirtschaftlich schwerwichtige Unterschiede, die eine getrennte Behandlung erforderten, zu beachten.⁴⁾

1) vgl. auch Rehbein, G., Wagner, H., Grundlagen der Ökonomik des Transport- und Nachrichtenwesens, Berlin 1967, S. 41 ff.;

2) vgl. Diederich, H., a.a.O., S. 41 f.;

3) vgl. Bendixen, F., Die Leistungserstellung der Güterverkehrsbetriebe, Diss. Hamburg 1966, S. 14 ff.; vgl. auch Predöhl, A., Verkehr, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Bd. 11, Stuttgart, Tübingen, Göttingen 1961, S. 103;

4) vgl. Diederich, H., a.a.O., S. 42; Bendixen, F., a.a.O., S. 14

Zumindest für die Zwecke dieser Arbeit braucht keine solche Trennung vorgenommen zu werden¹⁾, und es erscheint zweifelhaft, ob nicht doch überzeugendere Gründe für eine einheitliche Theorie des Personen- und Güterverkehrsbedriebs sprechen. Sicherlich bestehen sowohl technische als auch wirtschaftliche Unterschiede zwischen der Beförderung von Personen und Sachen. Betont man jedoch weniger die sowohl vom Industrie- als auch vom Güterverkehrsbetrieb vorgenommenen Veränderungen am Sachgegenstand, sondern die Ortsveränderung, so sind die Argumente für eine Zusammenfassung der personen- und güterbefördernden Verkehrsbetriebe stärker als die Argumente für eine Trennung.

Selbstverständlich ist für eine solche Sicht eine gewisse Abstraktion erforderlich. Sollen z.B. Fahrzeuge beladen oder entladen werden, so ist bei detaillierter Betrachtung eine Untersuchung der Ladeeinrichtungen erforderlich. Sollen Sachgüter verladen werden, sind z.B. Kräne, Saugrohre oder Kaianlagen nötig. Im Personenverkehr sind meist weniger technische Anlagen und Personal für das "Laden" und "Entladen" oder "Umladen" erforderlich, da die Personen lediglich durch Informationen gesteuert werden und aus eigener Kraft Fahrzeuge besteigen und verlassen können. In beiden Fällen werden Sachanlagen genutzt, das Laden und Entladen bzw. Einsteigen und Aussteigen nimmt Zeit in Anspruch und erfordert Aufwendungen. Investitionen, Zeitdauer und Aufwandshöhe werden zwar von der Art des Transportobjektes beeinflusst, die Unterschiede innerhalb des Güterverkehrs können aber grösser sein als die Unterschiede zum Personenverkehr.

1) vgl. auch Bendixen, P., a.a.O., S. 15 "Dem steht nicht entgegen, daß in anderen verkehrsbetrieblichen Problemen die Gemeinsamkeiten zwischen Personenverkehrsbetrieben und Güterverkehrsbetrieben im Vordergrund des Interesses stehen."

Gegen eine Trennung in zwei Verkehrsbetriebslehren spricht schließlich vor allem, daß Personen- und Güterverkehr häufig in einem Betrieb zusammengefaßt sind, auf gemeinsamen Anlagen und z.T. sogar mit einem einzigen Fahrzeug abgewickelt werden.¹⁾ Offensichtlich wird in solchen Fällen insbesondere bei Fahrplanungsproblemen eine wechselseitige Abstimmung zwischen Personen- und Güterverkehr erforderlich, die die gedankliche Trennung beider Verkehrsarten unzweckmäßig erscheinen läßt.

Neben dem Transportobjekt bestimmt die besondere Eigenart des Verkehrsmittels die technischen Eigenarten des Transportprozesses. Von diesen Unterschieden kann hier abstrahiert werden. Während z.B. der Sprachgebrauch nach dem Medium Land und Luft und den entsprechenden Verkehrsmitteln Fahrzeug und Flugzeug zwischen Fahrplan und Flugplan unterscheidet, soll in dieser Arbeit die prinzipiell gleiche Problematik beider Pläne unter einem Begriff behandelt werden. Wohl um Verstöße gegen den Sprachgebrauch zu vermeiden, spricht Pirath von planmäßigem Verkehr, wenn er Verkehrsbetriebe mit einem Fahr- bzw. Flugplan meint.²⁾ Im Anhang bezeichnet Pirath dagegen den Flugplan ebenfalls als Fahrplan³⁾.

Unter Verkehrsbetrieben sollen also im folgenden Betriebe verstanden werden, deren Hauptleistung die vollzogene Ortsveränderung von Transportobjekten (Personen und Sachen) ist. Dabei ist es gleichgültig, auf oder in welchen Medien und mit welchen Verkehrsmitteln die

1) Auf einem Fahrzeug werden z.B. durchgeführt: Personen- und Expreßgutverkehr bei Eisenbahnen, Passagier- und Postbeförderung im Flugverkehr und kombinierte Frachtgut- und Passagierbeförderung auf Kombischiffen. vgl. auch Krömmelbein, G., Leistungsverbundenheit im Verkehrsbetrieb, Berlin 1967, S. 70 - 80

2) vgl. Pirath, C., Die Grundlagen der Verkehrswirtschaft, 2. Aufl., Berlin, Göttingen, Heidelberg 1949, S.51

3) vgl. Pirath, C., a.a.O., Anhang Tafel III

Ortsveränderungen durchgeführt werden. Unberücksichtigt bleiben die Hilfsbetriebe des Verkehrs, die Nachrichtenverkehrsbetriebe sowie innerbetrieblicher Verkehr und Werksverkehr.¹⁾

II. Das Planungsergebnis:

Der Fahrplan

Um einen Zugang zum Fahrplanungsproblem zu gewinnen, empfiehlt es sich, vom anschaulichen Ergebnis der Fahrplanung, dem Fahrplan, auszugehen.

Im Sprachgebrauch sind Fahrpläne veröffentlichte Verzeichnisse der Abfahrts- und Ankunftszeiten von Fahrzeugen. Die Zeiten beziehen sich auf Orte, in denen für die Nachfrager die Möglichkeit besteht, Transportobjekte dem Verkehrsbetrieb zu übergeben, sie von ihm zu übernehmen, oder in denen die Nachfrager selbst umladen bzw. umsteigen können. Die Veröffentlichung bedeutet eine Bekanntmachung der Fahrpläne für einen Kreis potentieller Nachfrager. Falls die im Fahrplan angegebenen Zeiten mit den Vorstellungen der Nachfrager über die Beförderungszeiten übereinstimmen, werden dem Verkehrsbetrieb Aufträge erteilt, die dann später entsprechend den bereits festliegenden Fahrplänen erfüllt werden. Diese Art der Fahrpläne dient also einer externen, werbenden Information der potentiellen Nachfrager.

Fahrpläne dienen neben der Information der potentiellen Nachfrager auch der Information der effektiven Nachfrager oder Auftraggeber, deren Dispositionen anhand der Zeitangaben des Fahrplanes mit dem

1) vgl. zu diesem Begriffsumfang auch Klaus, G., Begriffe für Leistungs- und Kostenanalysen im Binnenverkehr, Düsseldorf 1963, S. 19 f.: Klaus grenzt ähnlich ab, bezeichnet diese Betriebe aber als Transportbetriebe. Zu den Verkehrsbetrieben rechnet er dagegen auch die Hilfsbetriebe, nicht aber die Nachrichtenverkehrsbetriebe.

zeitlichen Ablauf der Leistungserstellung des Verkehrsbetriebes abgestimmt werden müssen. Der Fahrplan bezweckt insofern eine externe, koordinierende Information. Eine Veröffentlichung ist hierfür nicht notwendig, die Informationen könnten stattdessen den effektiven Nachfragern gezielt zugesandt werden.

Den differenzierten Anforderungen an den externen Informationsgehalt begegnen die Verkehrsbetriebe meist mit differenzierten Fahrplänen.¹⁾ Die Deutsche Bundesbahn unterscheidet z.B. bei den Fahrplänen für den öffentlichen Gebrauch folgende Gruppen:

- 1) Aushangfahrpläne auf Bahnhöfen, in denen die den Bahnhof passierenden Züge in zeitlicher Reihenfolge geordnet sind.
- 2) Kursbücher für den Personen- und Güterverkehr mit einer Gliederung nach Strecken.
- 3) Taschenfahrpläne, die je nach Zweck bestimmte Auszüge aus den vollständigen Kursbüchern enthalten.²⁾

Um die Tätigkeiten des an der Leistungserstellung beteiligten Personals des Verkehrsbetriebes zu koordinieren, muß es über die geplanten Vorgänge ebenfalls informiert werden. Man kann dies im Gegensatz zu der externen, die Nachfrager betreffenden Information, als interne Information bezeichnen.

-
- 1) vgl. Chausette, G. Der Bildfahrplan, seine Entstehung, Form und Anwendung im In- und Ausland, in: Die Bundesbahn 25 (1951), S. 141 f.: "In der Frühzeit der Eisenbahn genügte die Aufstellung eines gemeinsamen Fahrplans ... Mit zunehmendem Zugverkehr ... erwiesen sich diese Unterlagen als zu unübersichtlich."
 - 2) vgl. Ott, T., Die Fahrpläne der Deutschen Bundesbahn, in: Eisenbahnfachmann 37 (1963), S. 367-369
v. Baross, M., Das amtliche Kursbuch - der Katalog der Deutschen Bundesbahn, in: Die Bundesbahn 30 (1956), S. 325-334
v. Baross, M., Vom Fernverbindungsteil zum Fernkursbuch, in: Die Bundesbahn 32 (1958), S. 468-473
Heinze, W., Veröffentlichung und Aushang von Fahrplänen, in: Die Bundesbahn 39 (1965), S. 112 ff.

Die andere Aufgabenstellung der internen Information erfordert zusätzliche Angaben und eine andere Gliederung des Fahrplanes. Um z.B. die Überholung eines Güterzuges durch einen D-Zug durchführen zu können, müßten Überholungsort und -zeitpunkt genau festgelegt sein und den für die Durchführung Verantwortlichen bekanntgemacht und verbindlich vorgeschrieben werden.¹⁾

Während für die externe Information lediglich die Zeiten für die Orte anzugeben sind, in denen für die Nachfrager die Möglichkeit besteht, Transportobjekte zu übergeben, zu übernehmen oder selbst umzuladen bzw. umzusteigen, muß die interne Information vielfältiger sein. Für die unmittelbar zur Beförderung von Objekten vorgesehenen Fahrten (Nutzfahrten) müssen zusätzliche Orte und Zeiten angegeben werden, um eine Abstimmung der Fahrten zu ermöglichen. Diese Nutzfahrten sind wiederum mit den dafür notwendigen Leerfahrten zu koordinieren. Die zeitliche und örtliche Ordnung der Leerfahrten ist deswegen ebenfalls in den Plänen zur internen Information zu berücksichtigen.

Je nach Zweck sind auch die Fahrpläne für die interne Information verschieden aufgebaut. Die Deutsche Bundesbahn benutzt z.B. folgende Dienstfahrpläne:

- 1) Bildfahrpläne, mit sämtlichen Zügen einer Strecke, die in ein Zeit-Weg-Diagramm eingezeichnet sind.
- 2) Buchfahrpläne, in denen die Zeitpläne einzelner Züge nach Zugnummern geordnet und aus denen weiterhin technische Angaben je Zug ersichtlich sind.

1) In der Realität besteht für den Fahrdienstleiter ein Spielraum für Planabweichungen; je nach der Größe der Störung des bisherigen Vollzugs können andere Überholungsorte und -zeiten gewählt werden. vgl. Fülling, F., Zugüberholung, in: Die Bundesbahn 32 (1958), S. 957-958.

- 3) Streckenfahrpläne, in denen die Züge in der zeitlichen Reihenfolge des Passierens von Betriebspunkten wie Blockstellen und Schrankenposten aufgeführt sind.¹⁾

Fahrpläne werden durch Zeichnungen und Zahlenangaben auf Blättern, in Büchern oder auf Tafeln u.ä. dargestellt. Die schriftliche Form ist aber nur eine Frage der Zweckmäßigkeit der Darstellung. Genauso ist es denkbar, die Angaben auf Lochkarten, Lochstreifen oder in den Speichern eines Computers zu erfassen und zu verarbeiten. Auch Tonbandaufzeichnungen und akustische Wiedergabe kann man als eine Art der Fahrplanaufzeichnung und Veröffentlichung ansehen.

In der Verkehrsliteratur²⁾ wird meist nur dann von einem Fahrplan gesprochen, wenn er zur Veröffentlichung vorgesehen ist, vor der Auftragsannahme entstanden ist und die Zeitangaben eine Regelmäßigkeit

1) vgl. Ott, T., a.a.O., S. 367-369

2) vgl. z.B. Chausette, G., a.a.O., S. 141;
Happel, O., Sperrzeiten für die Fahrplankonstruktion, in: Eisenbahntechnische Rundschau 8 (1959), S. 79;
Metzger, M., Der Fahrplan, in: Die Geheimnisse der Eisenbahn, 2. Aufl., Basel 1955, S. 616;
Pirath, C., a.a.O., S. 151;
Gutersohn, A., Der Eisenbahnfahrplan für den Personenverkehr, Dissertation Bern 1932, Solothurn 1940, S. 33;
Braun, W., Die Kapazität der Güterverkehrsbetriebe, Stuttgart 1959, S. 99;
Fähndrich, H., Der Fahrplan als Führungsinstrument der Verkehrsbetriebe, in: Mitteilungen der Österr. Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft 1965, S. 11 - 17, nach Fähndrich gibt es aber auch unveröffentlichte Fahrpläne (vgl. S. 13).

erkennen lassen. Dieser Fahrplanbegriff steht in einer engen Beziehung zum Begriff des Linienverkehrs der Verkehrsbetriebe. Der Linienverkehr wird in der Literatur mit den Merkmalen "Regelmäßigkeit" und "Fahrplanveröffentlichung vor Auftragsannahme" definiert.¹⁾ Man kann aufgrund der beiden in der Literatur angeführten Begriffsmerkmale des Fahrplans und des Linienverkehrs zu dem Schluß kommen, daß es Fahrpläne nur in Verbindung mit dem Linienverkehr gibt. Für die Form des Gelegenheitsverkehrs²⁾ könnte es dementsprechend keinen Fahrplan geben.

Es erscheint jedoch unzweckmäßig, nur im Zusammenhang mit Linienverkehr von einem Fahrplan zu sprechen. Die Existenz eines Fahrplans ist offensichtlich unabhängig davon, ob das Verzeichnis der Zeitangaben veröffentlicht wird, eine Regelmäßigkeit erkennen läßt, vor der Auftragsannahme geplant wird

-
- 1) Illetschko, Lechner und Klaus betonen das Merkmal "Regelmäßigkeit": vgl. Illetschko, L.L., Transportbetriebswirtschaftslehre, a.a.O., S. 105 "Im Linienverkehr geschieht dies durch die Regelmäßigkeit der Fahrten, ihre Bindung an Zeitpunkte in Abfahrts- und Ankunftsstellen, und als mittelbarer Niederschlag ergibt sich der Zeitplan, der Fahrplan ...". Lechner, K., a.a.O., S. 34 "Im Linienverkehr werden Personen und Güter auf Grund von Fahrplänen befördert, ... der Gelegenheitsverkehr dient aperiodischen Bedürfnissen und Anforderungen". Klaus, G. a.a.O., S. 21 "Unter Linienverkehr (=Regelverkehr, regelmäßiger Verkehr) ist eine regelmäßige Verbindung zwischen bestimmten Ausgangs- und Endpunkten zu verstehen." Bendixen betont das Merkmal der "Fahrplanaufstellung vor Auftragsannahme", vgl. Bendixen, P., a.a.O. S. 46 und 202 Pirath erwähnt sinngemäß beide Merkmale, vgl. Pirath, C., a.a.O., S. 51
- 2) Der Gelegenheitsverkehr wird in der Verkehrspraxis als Gegenbegriff zum Linienverkehr angesehen. Vgl. z.B. Personenbeförderungsgesetz (PBefG) § 46 (1): "Gelegenheitsverkehr ist die Beförderung von Personen mit Kraftfahrzeugen, die nicht Linienverkehr nach den §§ 42 und 43 ist."

oder ob jeweils das Gegenteil der Fall ist. Es kann also sowohl im Linienverkehr als auch im Gelegenheitsverkehr Fahrpläne geben.

In der Realität wird es allerdings eine Reihe von Verkehrsbetrieben mit Gelegenheitsverkehr geben, die keinen Fahrplan aufstellen. Dies liegt jedoch daran, daß tatsächlich oder scheinbar kein Plan und keine Planung erforderlich oder möglich sind. Bei übersichtlichen Verhältnissen in sehr kleinen Betrieben kann ohne Plan improvisiert werden, die Durchführung erfolgt also im wesentlichen ohne Vorausdenken und ohne systematische Einbeziehung von Zusammenhängen.

Eine Improvisation wird erstens dann erleichtert, wenn die Zahl der Einsatzmöglichkeiten mehrerer Fahrzeuge gering ist, zweitens, wenn einzelne Fahrzeugfahrten nicht mehr oder kaum noch zeitlich koordiniert werden müssen.

Häufig ist auch durch die Art der Auftragstellung und die allgemein übliche Art der Erfüllung dieser Aufträge kein Spielraum für die Aufstellung eines Fahrplans gegeben. Ein solcher Spielraum fehlt, wenn die Aufträge sofort auszuführen sind. Ein Beispiel dafür ist der übliche Taxiverkehr. Das Taxi wird meist zu sofortigem Fahrtantritt angefordert, für die Aufstellung eines Plans bleibt keine Zeit. Die Möglichkeiten, den Fahrzeugeinsatz zu planen, nehmen jedoch in dem Maße zu, wie der von den Nachfragern gesetzte Zeitraum für die Auftragserfüllung größer als der technisch bedingte Zeitbedarf ist.

Sobald also mehrere Alternativen bestehen, kann auch ein Fahrplan aufgestellt werden. Wenn außerdem die Zusammenhänge so kompliziert werden, daß eine Impro-

visation und eine Entscheidung unmittelbar vor der Durchführung nicht möglich sind oder zu Gewinneinbußen führen, wird ein Fahrplan erforderlich bzw. sinnvoll.

III. Die Planungstätigkeit:

Planung als Entscheidungsprozeß

Die Definition der Planung erleichtert eine funktionale Einordnung des Fahrplanungsproblems in das Begriffssystem der betriebswirtschaftlichen Planungs- und Entscheidungstheorie. Unter Planung¹⁾ ist ein geistiger Prozeß zu verstehen, in dem die verschiedenen Möglichkeiten zukünftigen Handelns in einem bestimmten Bereich systematisch verglichen und ausgewählt werden. Dabei sind die tatsächlich zu erwartenden Zusammenhänge im Planungsbereich möglichst weitgehend einzubeziehen. Das Ergebnis der Planung wird in einem Plan, der die Ordnung des zukünftigen Handelns wiedergibt, festgehalten.

Der Planungsbereich ist durch Aktionsparameter und Daten gekennzeichnet. Die Aktionsparameter können vom Planenden beeinflusst und zu Alternativen kombiniert

1) vgl. zum Planungsbegriff:

Adam, D., Produktionsplanung bei Sortenfertigung, Diss. Hamburg 1965, S. 1 ff.;

Ellinger, T., Ablaufplanung, Stuttgart 1955, S. 13 f.;

Grochla, E., Planung, Betriebliche, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Bd. 8, Stuttgart, Tübingen, Göttingen 1964, S. 314-325;

Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 1, Die Produktion, 11. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York 1966;

Koch, H., Planung, in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Bd. 3, 3. Auflage, Stuttgart 1960, Sp. 4340-4352;

Kosiol, E., Zur Problematik der Planung in der Unternehmung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 37. Jg. (1967), S. 77 - 96;

werden. Die Daten geben die Grenzen an, innerhalb denen die Aktionsparameter variierbar sind. Die Auswahl unter den möglichen Aktionsparametern bzw. den Alternativen erfolgt anhand eines Zieles, das für den Planungsbereich vorgegeben oder aus übergeordneten Zielen abzuleiten ist.

Der geistige Prozeß der Planung kann als ein Entscheidungsprozeß gesehen werden, in dem verschiedene Alternativen zu vergleichen und auszuwählen sind. Die Merkmale der Planung und des Entscheidungsprozesses entsprechen sich weitgehend. Begriffe der Entscheidungstheorie stimmen also mit den Begriffen der Planungstheorie überein. Auf die Abgrenzung zwischen Entscheidungsprozessen, die zugleich Planungsprozesse sind und Entscheidungsprozessen, die nicht als Planung anzusprechen sind, soll hier nicht eingegangen werden. Für den weiteren Fortgang der Arbeit ist es lediglich von Bedeutung, daß ergänzend auf Ergebnisse der Entscheidungstheorie zurückgegriffen werden kann. Da sich die Begriffe der Planungstheorie und Entscheidungstheorie weitgehend entsprechen, können die Begriffe Planungsbereich und Entscheidungsfeld, Menge der Aktionsparameter und Aktionsfeld, Daten und Umwelt synonym gebraucht werden.

Ein Entscheidungsfeld kann auf zweierlei Weise abgegrenzt werden: einmal durch Angabe sämtlicher möglicher oder zumindest bekannter Alternativen,¹⁾ zum

1) vgl. Engels, W., Betriebswirtschaftliche Bewertungslehre im Lichte der Entscheidungstheorie, Köln und Opladen 1962, S. 81 ff., S. 93 und S.18:
"Wir nennen die Gesamtheit der Alternativen das Entscheidungsfeld..." (S.18)

anderen durch Angabe der beeinflussbaren und der begrenzenden Größen, also durch Aktionsfeld und Umwelt bzw. Aktionsparameter und Daten.¹⁾ Meist ist nur die zweite Art der Abgrenzung, die Umschreibung des Entscheidungsfeldes, möglich, da die Zahl der Alternativen zu groß ist, um aufzählbar zu sein.²⁾

Der Planung folgt die Realisation des Geplanten, die nach den Ergebnissen der Planung, die im Plan festgehalten sind, abläuft. Die zweckgerechte Ausarbeitung und Verarbeitung der Pläne für die Information der beteiligten Personen dient der Durchsetzung der Planungsergebnisse und soll in dieser Arbeit nicht mehr zur Planung gerechnet werden. Der Realisation folgt dann meist noch die Kontrolle, ein Soll-Ist-Vergleich zwischen Plan und Realisationsergebnis.

Die Planungstätigkeit stellt ihrerseits eine Realisation dar, die wiederum geplant werden kann. Man kann in diesem Zusammenhang von einer Planung der Planung oder von einer Metaplanung sprechen.³⁾

Bei der Fahrplanung tritt im Zusammenhang mit der Metaplanung vor allem die Frage auf, mit welcher Genauigkeit und in welchem zeitlichen Abstand zum eigentlichen Vollzug die Planung durchzuführen ist. Es geht also darum, ob die Planung bereits im ersten Arbeitsgang bis ins letzte detailliert wird, oder ob zunächst eine Grobplanung durchgeführt wird, die durch eine Detailplanung erst kurz vor der Realisation zu ergänzen ist.

1) vgl. Engels, W., a.a.O., S. 94 "Wir definieren daher 'Entscheidungsfeld' als die Menge und Art der Personen und Daten, die durch einen Willensakt direkt oder indirekt beeinflusst werden können, und die Gegebenheiten der Umwelt, die den Erfolg der Willensakte beeinflussen."

vgl. auch Heinen, E., Betriebswirtschaftliche Kostenlehre, Bd. 1, Begriff und Theorie der Kosten, 2. Aufl., Wiesbaden 1965, S. 332 ff.

2) vgl. Engels, W., a.a.O., S. 94

3) vgl. Kosiol, E., a.a.O., S. 83

Abhängig ist das Verhältnis zwischen Grob- und Detailplanung u.a. von der Möglichkeit und dem Umfang von Datenänderungen in der Zeit zwischen Planung und Realisation. Ändern sich die Daten relativ rasch, so wird man entweder erst kurz vor der Durchführung mit der Planung beginnen oder zunächst eine Grobplanung vornehmen und die Detailplanung erst unmittelbar vor der Durchführung ansetzen. Die Frage z.B., ob Linienverkehr oder Gelegenheitsverkehr durchgeführt werden soll, ist u.a. ein Problem der Metaplanung. Im Fall des Linienverkehrs ist entschieden worden, daß die zeitliche Planung vor Auftragsannahme erfolgt, beim Gelegenheitsverkehr wird dagegen erst nach Auftragsannahme geplant.

Bessere Informationen über die voraussichtlich auftretende Nachfrage ermöglichen eine frühzeitigere Detailplanung vor Auftragsannahme als sehr unsichere Informationen über die Nachfragestruktur. Auch die Möglichkeit, zukünftige Betriebsabläufe genau vorausberechnen zu können und die Störanfälligkeit dieser Abläufe¹⁾ entscheiden über das Verhältnis von Grob- zu Detailplanung und den Zeitabstand zwischen ihnen.

Der Zwang zu einer detaillierten Planung wächst außerdem mit dem Ausmaß der Bindung an einen Verkehrsweg und der Dichte des Verkehrs. Bei der Eisenbahn bestehen z.B. sehr viele solcher Abhängigkeiten.²⁾ Bereits die Suche nach realisierbaren Möglichkeiten erfordert hier eine weitgehende Detaillierung der Planung.

1) vgl. Potthoff, G., Steuerung und Zufall im Eisenbahnbetrieb, in: Wissenschaftliche Zeitschrift für Verkehrswesen, 7 (1959/60), S. 97-102. Potthoff unterscheidet oszillative Schwankungen, mittlere Abweichungen und Unfälle mit schwerer Beeinträchtigung des planmäßigen Ablaufs.

2) vgl. Chaurette, G., a.a.O., S. 141 ff.

Probleme der Metaplanung wie die Frage nach dem Verhältnis von Grob- zu Detailplanung, ebenso wie Fragen der Informationsgewinnung mitsamt dem Problem der Unsicherheit zukünftiger Daten und Fragen der Organisation des Planungsprozesses sollen im folgenden unberücksichtigt bleiben. Auf diese Weise wird eine Abstraktion von konkreten Einzelfällen ermöglicht, da auf besondere Informationsprobleme und Organisationsformen einzelner Verkehrsbetriebe keine Rücksicht genommen zu werden braucht.

Die Planungstätigkeit von Verkehrsbetrieben, die zu einem Fahrplan führt, ist als Fahrplanung zu bezeichnen. Das Fahrplanungsproblem, das durch die Fahrplanung gelöst werden soll, ist die zielgerechte Festlegung von zulässigen Aktionsparametern des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung. Das Entscheidungsfeld soll nun näher untersucht werden.

B. Abgrenzung und Strukturierung des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung

I. Überblick

Durch die Abgrenzung und Strukturierung des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung läßt sich das gesamte Planungsfeld eines Verkehrsbetriebes in 3 Bereiche einteilen.

Der 1. Bereich wird von den Aktionsparametern des Entscheidungsfeldes gebildet. Zu den Aktionsparametern sind einmal die beeinflussbaren Größen zu zählen, die im Fahrplan endgültig fixiert werden. Hinzu kommen noch die Größen, die mit den zunächst abgegrenzten

Aktionsparametern in wechselseitiger Beziehung stehen. Von einer wechselseitigen Beziehung soll dann gesprochen werden, wenn beeinflussbare Größen nur in gegenseitiger Abstimmung sinnvoll festzulegen sind. Würde man in diesen Fällen zunächst eine Größe festlegen und die andere daran anpassen, würde man ein Ergebnis erzielen, das bei den meisten denkbaren Planungszielen nicht einer zielgerechten, optimalen Lösung entsprechen wird.

Zu den Aktionsparametern sind mit anderen Worten die Variablen jener Bereiche zu zählen, für die eine simultane Planung zu fordern ist. Es sollen allerdings nur die wichtigsten Zusammenhänge berücksichtigt werden, um eine Abgrenzung des Problems zu erreichen. Andererseits wird in diesem Teil (Teil 1) der Untersuchung keine Rücksicht darauf genommen, ob eine simultane Planung tatsächlich durchführbar ist.

Der 2. Bereich wird von den Daten des Entscheidungsfeldes gebildet. Daten sind die Gegebenheiten, die den Spielraum für die Festlegung der Aktionsparameter einseitig einschränken können. Zu den Daten des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung gehören natürliche Gegebenheiten, effektive und mögliche Aktionen und Reaktionen fremder Entscheidungsträger sowie Ergebnisse eines Teils der übrigen Planung des Verkehrsbetriebes.

Unter den natürlichen Gegebenheiten sind physikalische, physische und psychische Gesetzmäßigkeiten zu verstehen. Fremde Entscheidungsträger sind der Staat, die Nachfrager nach Verkehrsleistungen, die Anbieter der Produktionsmittel und der Arbeit und die Verkehrsteilnehmer, die sich mit dem Verkehrsbetrieb die Kapazität von Anlagen wie Häfen und Straßen teilen.

Von den Ergebnissen der übrigen Planung des Verkehrsbetriebes gehören diejenigen zu den Daten, die vor der Fahrplanung geplant und festgelegt wurden und Grenzen für die Festlegung der Aktionsparameter bilden können. Die auf den Ergebnissen der Fahrplanung aufbauenden Planungen bilden demgegenüber keine Fahrplanungsdaten, da sie die Aktionsparameter der Fahrplanung nicht einzuschränken vermögen. Vor der Fahrplanung geplant werden zweckmäßigerweise die längerfristig gültigen Bereiche, die entweder überhaupt nicht, umständlich und langwierig oder nur mit hohen Aufwendungen an die kurzfristigere Fahrplanung anzupassen sind. Dies schließt natürlich nicht aus, daß Vorstellungen über die Fahrplanungsergebnisse eines längeren Zeitraumes bei diesen Planungen berücksichtigt werden müssen.

Der 3. Bereich wird von allen übrigen, außerhalb des Entscheidungsfeldes liegenden Gegebenheiten eines Verkehrsbetriebes gebildet. Diese Gegebenheiten stehen weder in wechselseitiger Beziehung zu den Aktionsparametern, noch begrenzen sie die Aktionsparameter einseitig, sie sind also weder den Aktionsparametern noch den Daten zuzurechnen. Sie sind somit vollständig unabhängig von der Fahrplanung oder lassen sich ohne Einfluß auf die Verwirklichung eines Fahrplanungszieles einseitig an die Ergebnisse der Fahrplanung anpassen. Produktionsfaktoren des 3. Bereichs werden in diesen Fällen für die Vorgänge im Entscheidungsfeld der Fahrplanung überhaupt nicht benötigt oder stehen unbegrenzt zur Verfügung; Vorgänge im 3. Bereich können ohne Kosten an die Vorgänge im Entscheidungsfeld angepaßt werden.

In der Realität ist eine derartige Isolierung des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung nicht möglich, da letztlich alle Teilbereiche eines Betriebes zusammenhängen. Sowohl für praktische als auch für theoretische Zwecke müssen jedoch Einschnitte in diese Zusammenhänge vorgenommen werden, um Probleme abgrenzen zu können. Es muß genügen, die wichtigsten Zusammenhänge zu erfassen.

II. Die Aktionsparameter

1) Fahrzeugzuordnungen

Ein Fahrplan enthält Angaben über Fahrzeugankünfte und -abfahrtszeiten für bestimmte Orte. Wird eine Fahrt an einem Ort nicht durch einen Halt unterbrochen, ist für diesen Ort lediglich eine Durchfahrtszeit angegeben. Die im Fahrplan enthaltenen Zeit- und Ortsangaben für die Fahrzeuge sind das Ergebnis der Fahrplanung, einer Auswahl aus vielen möglichen Zuordnungen von Fahrzeugen zu Zeit und Ort. Die denkbaren Zuordnungen der Fahrzeuge zu Kombinationen von Zeit und Ort können als Aktionsparameter der Fahrplanung angesehen werden.

Auch Bewegungsvorgänge mit verschiedenen Geschwindigkeiten sowie Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge können als derartige Fahrzeugzuordnungen interpretiert werden. Die Angabe zweier Orte am Anfang und Ende einer Strecke und die dazugehörigen Abfahrts- und Ankunftszeiten kennzeichnen zugleich die Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Strecke. Die tatsächliche Bewegung des Fahrzeugs durch Zeit und Raum läßt sich jedoch auf diese Weise nur unvollständig erfassen, da unzählige Kombinationen

aller nur abschnittsweise eingehaltenen Geschwindigkeitsstufen denkbar sind, die alle zur gleichen Durchschnittsgeschwindigkeit auf der Gesamtstrecke führen. Je mehr Orte mit dazugehörigen Zeitangaben die Bewegung des Fahrzeugs erfassen, desto genauere Angaben sind über die Zusammensetzung der Durchschnittsgeschwindigkeit auf der gesamten Strecke zu machen. Läßt man den Abstand dieser Orte gegen Null streben, sind schließlich auch Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge als Zuordnungen der Fahrzeuge zu Zeit und Ort erfaßbar.

In manchen Fällen sind die Fahrzeugzuordnungen in zwei Gruppen von Aktionsparametern, zwischen denen starke wechselseitige Beziehungen bestehen, zu trennen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei manchen Transportverfahren das Antriebsaggregat und das Transportgefäß zur Aufnahme der Transportobjekte nur lose miteinander gekoppelt sind und keine untrennbare konstruktive Einheit bilden.¹⁾ Flugzeuge und Seeschiffe sind z.B. immer nur als Einheiten einzusetzen, während in anderen Verkehrszweigen sowohl die feste als auch die lose Koppelung angewandt werden. Beispiele loser Koppelung finden sich bei Eisenbahnzügen, Schleppzügen und Schubschiffen im Binnenschiffsverkehr, Lastzügen und Sattelschleppern im Straßenverkehr.

Auch bei loser Koppelung können Aggregate und Transportgefäße jeweils in unveränderlichen Zügen als Fahrzeuginheiten eingesetzt werden. In diesem Fall

1) vgl. Pirath, C., a.a.O., S. 143 f.;
Bendixen, P., a.a.O., S. 176 ff.

begibt man sich jedoch der Vorteile, die die lose Koppelung dadurch bietet, daß der zeitlich-örtliche Einsatz von Aggregaten und Transportgefäßen getrennt möglich ist. Transportgefäßbewegungen sind zwar nicht ohne Aggregatbewegungen denkbar, Aggregatbewegungen und -ruhezeiten ohne Transportgefäß und Ruhezeiten für Transportgefäße ohne Aggregat sind dagegen möglich.¹⁾ Statt von Fahrzeug-Zuordnungen kann man nun von getrennten Aggregat- und Transportgefäß-Zuordnungen zu Zeit und Ort sprechen. Zwischen beiden Zuordnungen bestehen wechselseitige Beziehungen. Auf die Vorteile der losen Koppelung durch die Ausnutzung der Trennungsmöglichkeiten und auf die wechselseitigen Beziehungen zwischen Aggregat- und Transportgefäßzuordnungen soll kurz eingegangen werden.

Die lose Koppelung ermöglicht eine quantitative und qualitative Anpassung an Menge und Art der Transportobjekte durch An- oder Abkoppeln von Standard- bzw. Spezialgefäßen.²⁾ Die Anpassung durch Ankoppeln zusätzlicher Gefäße setzt wiederum die Bereitstellung von Transportgefäßen in ausreichender Anzahl am richtigen Ort und zum richtigen Zeitpunkt voraus. Die Bereitstellungen können sich im unmittelbaren Anschluß an Nutzfahrten durch Abkoppeln zu entleeren der Transportgefäße ergeben oder durch besondere Leerfahrten erfolgen. Die Leerfahrten zur Bereitstellung von Transportgefäßen für spätere Nutzfahrten bauen ihrerseits wieder auf zuvor abgeschlossenen

-
- 1) Im Eisenbahnbetrieb sind Waggonen streckenweise ohne Aggregate zu bewegen, falls entsprechende Einrichtungen wie Ablaufberge vorhanden sind. Bei der Untersuchung von Eisenbahnbetrieben ist es überhaupt zweckmäßig, Rangierfahrten mit speziellen Rangierloks von den eigentlichen Transportvorgängen abzusondern.
 - 2) vgl. Pirath, C., a.a.O., S. 184 ff.
Bendixen, P., a.a.O., S. 177 f.

früheren Nutzfahrten auf. Diese Zusammenhänge gilt es bei der Fahrplanung zu erfassen.

In manchen Fällen kann eine Umladung der Transportobjekte von einem zum anderen Fahrzeug Vorteile bieten. Aus der Anschauung ist dies in der Form des Umsteigens im Personenverkehr bekannt. Statt von jedem Ort zu jedem Ort direkt zu fahren, werden einige Hauptverbindungen direkt befahren, die übrigen sind nur durch Umladen bzw. Umsteigen erreichbar. Bei loser Koppelung kann man in diesen Fällen Umladen oder Umsteigen durch Umrangieren der Transportgefäße ersetzen. Umrangieren kann kostengünstiger oder, wie beispielsweise im Eisenbahnpersonenverkehr mit Kurswagen, auch ertragsgünstiger sein als Umladen. Der örtlich-zeitliche Einsatz des abkoppelnden und des ankoppelnden Zuges sind genau aufeinander abzustimmen.

Ferner ist es durch die lose Koppelung bei langen Ladezeiten möglich, während des Ladevorganges nur das abgekoppelte, zu beladende Transportgefäß warten zu lassen, nicht dagegen das Aggregat und weitere Transportgefäße samt bereits geladenen Transportobjekten.¹⁾ Die Bereitstellungsmöglichkeiten hängen wiederum von unmittelbar zuvor am gleichen Ort abgeschlossenen Nutzfahrten und von Leerfahrten ab, die die erforderliche Anzahl von Transportgefäßen rechtzeitig zum Bedarfsort schaffen.

2) Transportobjektzuordnungen

Fahrzeugbewegungen und -ruhezeiten sind in den Verkehrsbetrieben nicht Selbstzweck, sondern ein Mittel zur Ortsveränderung von Transportobjekten. Wenn ein

1) vgl. Bendixen, P., a.a.O., S. 181 f.

vollständiger Zusammenhang zwischen beiden Vorgängen bestünde, genügte die Planung nur eines Vorganges. Ein scheinbar vollständiger Zusammenhang besteht insofern, als für die Ortsveränderung von Transportobjekten Fahrzeuge eingesetzt werden müssen. Der Zusammenhang ist jedoch nicht vollständig. Für gleiche und gleichzeitige Ortsveränderungen von Transportobjekten ist der entsprechende Fahrzeugeinsatz nicht eindeutig determiniert, denn für die gleiche Ortsveränderung eines Objektes sind verschiedene, alternative vorhergehende und folgende Fahrzeugbewegungen möglich. Für die Transportobjekte gibt es außerdem Ruhezeiten vor, nach und zwischen den Bewegungen mit Fahrzeugen. Die Dauer der Ruhezeiten hängt von den Entscheidungen über die Fahrzeugzuordnungen ab, ohne jedoch eindeutig von ihnen determiniert zu werden.

Die Transportobjektbewegungen und -ruhezeiten können analog zu den Fahrzeugzuordnungen als Transportobjektzuordnungen zu Zeit und Ort gedeutet werden. Sie treten bei allen Fahrplanungsproblemen auf, während Fahrzeugzuordnungen bei manchen Transportverfahren, wie z.B. dem Transport mit Pipelines, nicht möglich sind. Fahrzeug- und Transportobjektzuordnungen müssen aufeinander abgestimmt werden und sind als Aktionsparameter in ein einziges Entscheidungsfeld einzubeziehen.

3) Fahrpersonalzuordnungen

In den meisten Verkehrsbetrieben wird für Steuerung und Regelung der Fahrzeuge sowie für die Betreuung und Behandlung der Transportobjekte Fahrpersonal, das auf den Fahrzeugen mitfährt, benötigt.

Für eine Abfolge von Fahrzeugzuordnungen lassen sich unterschiedliche Fahrpersonaleinsätze denken. Da die Fahrzufahrten nicht immer am Wohnort des Personals

beginnen und enden, ist das Personal zum Einsatzort zu bringen bzw. zum Heimatort zurückzubefördern. Statt Rückkehr zum Heimatort kann alternativ eine Übernachtung im Fahrzeug oder in einem Hotel geplant werden. Die Heranführung des Personals zum Einsatzort kann mit Fahrzeugnutzfahrten erfolgen. Diese Nutzfahrten oder die Fahrt, die mit Personal zu besetzen ist, können zeitlich und örtlich verlagert werden, um rechtzeitigen Personaleinsatz am richtigen Ort zu ermöglichen. Als weitere Alternativen bieten sich an: Längere Wartezeiten des Personals vor dem Einsatz, spezielle Leerfahrten ausschließlich zur Heranführung des Personals, ohne dabei fremde Transportobjekte zu befördern oder die Benutzung der Verkehrsmittel fremder Verkehrsbetriebe.

Die Fahrpersonalbewegungen und -ruhezeiten können als Fahrpersonalzuordnungen zu Zeit und Ort aufgefaßt werden. Zwischen Fahrpersonal-, Fahrzeug- und Transportobjektzuordnungen bestehen wechselseitige Beziehungen, die es erforderlich machen, die Zuordnungsgruppen als Aktionsparameter in ein Entscheidungsfeld einzubeziehen.

Ähnlich wie bei Fahrzeugen zwischen Aggregaten und Transportgefäßen unterschieden wurde, kann beim Fahrpersonal zwischen Aggregat- und Begleitpersonal unterschieden werden.

Aggregatpersonal ist das auf den Fahrzeugen bzw. Aggregaten mitfahrende Personal, das die Regelung der Fahrzeugfahrten entsprechend dem Fahrplan vorzunehmen hat und das außerdem vor der Fahrt für die Fahrbereitschaft der Aggregate und nach der

Fahrt für die Außerdienststellung der Aggregate sorgt. Es handelt sich dabei z.B. um LKW-Fahrer, Lokomotivführer, Heizer, Flugkapitäne, Navigatoren, Bordmechaniker sowie um Schiffsbesatzungen des seemannischen und technischen Dienstes. Aggregatpersonal wird überflüssig, wenn es gelingt, die Regelung der Fahrzeugbewegungen anhand eines detaillierten Fahrplans ohne Einschaltung von Menschen durchzuführen.¹⁾

Als Begleitpersonal ist das auf den Fahrzeugen mitfahrende Personal anzusehen, das die Behandlung der Transportobjekte während der Transporte übernimmt. Im Personenverkehr sind es z.B. Schaffner, Zugbegleiter, Stewards oder Stewardessen, die die Aufgabe haben, die mitfahrenden Personen abzufertigen und zu betreuen. Auch für Sachen ist Begleitpersonal denkbar. Ein Beispiel ist das im Gepäckwagen der Eisenbahn mitfahrende Personal, das neben dem Ein- und Ausladen auch Objektbehandlungen wie Umsortieren von Briefsendungen vornehmen kann.

1) vgl. zu diesem Regelungsproblem Pierick, K., Lösungswege für die Steuerung und Regelung von Triebfahrzeugen, in: Eisenbahntechnische Rundschau 14 (1965), S. 265 ff.; Lagershausen, H., Das Fahren auf elektrische Sicht, warum und wie?, in: Eisenbahntechnische Rundschau 14 (1965), S. 221 f. Beide Autoren weisen darauf hin, daß Signalübertragungen auf den Führerstand von Lokomotiven eine genauere Regelung als bisher zulassen würden. Gelingt es, die Anweisungen über Fahrzeug-Zuordnungen in sehr kurzen Zeitabständen zu geben, wäre es nur noch ein kleiner Schritt bis zur automatischen, führerlosen Steuerung anhand entsprechend exakter Fahrpläne.

In vielen Fällen ist es nicht notwendig, Aggregat- und Begleitpersonaleinsätze getrennt zu erfassen. Im Flugverkehr werden beispielsweise jeweils Flugzeugbesatzungen einzusetzen sein. Im Eisenbahnverkehr kann es dagegen Vorteile bieten, die Möglichkeit unterschiedlicher Einsätze des Aggregat- und Begleitpersonals auszunutzen. In solchen Fällen ist es sinnvoll, Zuordnungen von Aggregat- und Begleitpersonal zu unterscheiden.

Die Aktionsparameter des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung können sich also in bis zu 5 Gruppen einteilen lassen: Zuordnungen von Aggregaten, Transportgefäßen, Objekten, Aggregatpersonal und Begleitpersonal zu Zeit und Ort.

III. Die Daten

- 1) Sachliche und personelle Produktionsmittel
 - a) Fahrzeuge

Wichtige, als Daten in Erscheinung tretende Eigenschaften der Fahrzeuge sind Höchstgeschwindigkeit, quantitatives und qualitatives Ladevermögen und, bei loser Koppelung, Zugbildungsfähigkeit aus Aggregat und Transportgefäßen.

Die Geschwindigkeit ist nicht vom Fahrzeug allein abhängig, sondern auch vom Ausmaß der Beladung und von den Wegverhältnissen. Bei der Planung von Fahrzeugbewegungen ist darauf zu achten, daß die durch Fahrzeug, Auslastungsgrad und Wegabschnitt determinierten Geschwindigkeitsgrenzen eingehalten werden.

Das quantitative Ladevermögen der Fahrzeuge ist durch Gewichts- und Volumengrenzen gegeben. Eine der beiden Grenzen wird bei einem vollbeladenen oder vollbesetzten Fahrzeug erreicht. Im Personenverkehr spricht man statt von Volumenkapazität besser von Sitzplatz- oder Stehplatz-Kapazität. Der Raum- oder Gewichtsbedarf der Transportobjekte muß mit dem Ladevermögen der Fahrzeuge abgestimmt werden. Falls in einem Zeitpunkt mehr Fahrzeugkapazität an eine Station herangeführt wird, als technisch notwendig und aufgrund der Nachfrage erforderlich, bedingt dies überflüssige Fahrzeugbewegungen. Wird dagegen zuwenig Fahrzeugkapazität herangeführt, bedingt dies Nachfrageausfälle. Es genügt jedoch nicht, Nachfrage und Ladevermögen für nur einen Zeitpunkt und eine Station abzustimmen. Vielmehr muß ein Kompromiß innerhalb der gesamten Planungsperiode gefunden werden, der einzelne, scheinbar ungünstige Relationen zwischen Gewicht oder Volumen der zu befördern- den Transportobjekte und dem Ladevermögen notwendig machen kann.

Die quantitative Zugbildungsfähigkeit bestimmt die Zahl der maximal mit einem Aggregat oder mit mehreren Aggregaten zugleich beförderbaren Transportgefäße. Außer durch die Größe der einzelnen Transportgefäße wird durch sie das quantitative Ladevermögen eines Zuges festgelegt. Die quantitative Zugbildungsfähigkeit ist einmal von der Antriebskraft der Aggregate und dem Gewicht der angehängten leeren oder beladenen Transportgefäße abhängig. Zum anderen wird sie durch die Führungsfähigkeit des Weges und die Aufnahmefähigkeit einzelner Wegabschnitte bestimmt.

Außer der quantitativen ist die qualitative Kapazität zu beachten. Von einer qualitativen Kapazität der Fahrzeuge kann man dann sprechen, wenn die Transportgefäße in unterschiedlichem Ausmaß auf bestimmte Transportobjektgruppen, die Aggregate auf bestimmte Transportgefäßarten für die Zugbildung spezialisiert sind.

Solche Spezialisierungen sind zum Teil durch die besonderen Arten von Transportobjekten technisch bedingt. Sie können jedoch auch ohne technische Notwendigkeit festgelegt worden sein, um beim Be- und Entladen sowie beim einzelnen Transportvorgang wirtschaftliche Vorteile zu erreichen.

Den Vorteilen bei den einzelnen Vorgängen stehen jedoch im allgemeinen Nachteile durch eine erschwerte Gesamtplanung gegenüber. Die Zuordnung der spezialisierten Fahrzeuge zu den entsprechenden Transportobjekten bedingt längere Anfahrtwege, weil näher am Bedarfsort stehende Fahrzeuge möglicherweise wieder auf andere Transportobjekte spezialisiert sind und somit nicht für den Transport in Frage kommen.. Können die spezialisierten Fahrzeuge nicht mehr rechtzeitig herangeführt werden oder reicht ihr Ladevermögen nicht aus, müssen Beförderungen ausfallen. Die langen Bereitstellungsfahrten und die Nachfrageausfälle sind somit durch den hohen Spezialisierungsgrad der Fahrzeuge bedingt.

Ähnliche Aussagen lassen sich für Aggregate und Transportgefäße machen, die aufeinander spezialisiert sind. Auch hier stehen den Vorteilen bei den Einzelvorgängen Nachteile bei Betrachtung des Gesamtablaufs gegenüber.

b) Stationen

In den Stationen übernimmt der Verkehrsbetrieb Transportobjekte und gibt sie nach dem Transport wieder ab, die Fahrzeuge werden dort be- und entladen und bei Transportverfahren mit loser Kopplung werden Transportgefäße umgruppiert.

Zur Erfüllung dieser Aufgaben sind die Stationen mit zahlreichen Hilfsmitteln ausgerüstet. Für die Behandlung von Sachen sind Güterannahmen und -ausgaben, Läger, Fördermittel, Lade- und Löschanlagen eingerichtet. Entsprechend können für Personen Empfangs- und Abfertigungshallen, Warteräume, Transferbusse, Rolltreppen und Bahnsteige vorgesehen sein. Für die zu be- und entladenden Fahrzeuge sind Bahnsteiggeleise, Stellflächen oder Liegeplätze angelegt. Ablaufberge, Richtungsgeleise und Rangierloks dienen der Umgruppierung von Transportgefäßen.

Die quantitative Kapazität der Stationen ist entsprechend den vielfältigen Hilfseinrichtungen nicht in einer Größe zu messen. Es sind Kapazitätsmaße für die Lagerungsfähigkeit für Transportobjekte, die Leistungsfähigkeit der Umschlagseinrichtungen, sowie die Rangierkapazität erforderlich.

Die Lagerungsfähigkeit kann in Flächen- oder Raummaßen der Lagerräume, deren Größe die gleichzeitig zu lagernden Objektmengen begrenzt, angegeben werden.

Zu den Umschlagseinrichtungen gehören die Lade- und Entladeeinrichtungen sowie die entsprechenden Liegeplätze oder Stellflächen für die zu be-

oder entladenden Fahrzeuge. Bei fehlender Abstimmung zwischen diesen Anlagen ist eine der Anlagen der begrenzende Faktor. Die Leistungsfähigkeit der Umschlagseinrichtungen läßt sich durch die in einem Zeitabschnitt maximal zu verladende Objektmenge oder die minimale Umschlagszeit für eine gegebene Objektmenge ausdrücken.

Die Rangierkapazität ist durch die in einem Zeitabschnitt maximal umgruppierbaren Transportgefäße oder die minimale Umstellzeit für eine gegebene Anzahl von Transportgefäßen zu erfassen.

Bei begrenzter Lagerungsfähigkeit müssen die Absender die Transportobjekte bis zum eigentlichen Transportvorgang selber lagern, die Empfänger müssen die Transportobjekte sofort übernehmen. Die knappe Lagerkapazität kann weiterhin dazu führen, daß von den Abgangsstationen vermehrte Transporte erforderlich sind. In den Empfangsstationen mit knapper Lagerkapazität kann es dagegen zu Wartezeiten der beladenen Fahrzeuge kommen.

Bei einer Überforderung der Umschlagseinrichtungen müssen die Fahrzeuge länger auf das Beladen oder Entladen warten. Sind nur die Förderanlagen zu gering dimensioniert, können die Fahrzeuge in den Stationen warten, fehlt es an Stellflächen, müssen die Fahrzeuge auf den Wegen vor der Station warten oder so langsam fahren, daß bis zur Ankunft wieder Stellflächen geräumt sind. In jedem Falle verzögert sich dadurch der frühestmögliche Ablieferungszeitpunkt der Transportobjekte.

Zu klein dimensionierte Rangieranlagen verlängern den Einsatz der umzugruppierenden Transportgefäße für einen Transportvorgang und verhindern dadurch anderweitige Einsatzmöglichkeiten. Sind die Transportgefäße beladen, verzögert sich zugleich wieder der frühestmögliche Ablieferungszeitpunkt der geladenen Transportobjekte.

Die qualitative Kapazität von Stationen läßt sich auch als Ausmaß der Spezialisierung der Einrichtungen auf bestimmte Transportobjekte und Fahrzeuge erfassen. Die Spezialisierung auf nur wenige Arten von Transportobjekten und Fahrzeugen erlaubt die Anwendung spezieller Umschlagsverfahren. Dem Spezialisierungsvorteil steht der Nachteil begrenzter Nutzbarkeit durch nur wenige Arten von Transportobjekten und Fahrzeugen gegenüber.

Für Transportverfahren ohne Fahrzeug lassen sich ähnliche Überlegungen über die quantitative und qualitative Kapazität von Stationen anstellen. Die Restriktionen durch begrenzte Stationskapazität wirken sich hier unmittelbar, ohne Zwischenschaltung von Fahrzeugen, auf die Transportvorgänge aus.

c) Depots

11) Fahrzeugdepots

Die technischen Eigenheiten der Fahrzeuge erfordern spezielle Einrichtungen, die als Fahrzeugdepots bezeichnet werden sollen. Die Fahrzeugdepots umfassen Stellflächen für die vorübergehende Stilllegung von Fahrzeugen, Lager- und Versorgungseinrichtungen für die Treibstoffversorgung sowie Ersatzteilläger und Werkstätten für die Durchführung von Inspektionen und Reparaturen.

Ausmaß und Größe der Stellflächen begrenzen die Anzahl der gleichzeitig stillzulegenden Fahrzeuge. Die Kapazität der Treibstoffversorgung kann durch die pro Zeiteinheit zu versorgenden Fahrzeuge oder die für ein Fahrzeug erforderliche Zeit gemessen werden. Die Werkstattkapazität kann durch die pro Zeiteinheit möglichen Arbeiten oder die maximale Zahl der gleichzeitig zu betreuenden Fahrzeuge angegeben werden.

Größe und Standort der Fahrzeugdepots wirken sich stark auf die Fahrplanung aus. Die Fahrzeuge müssen, unabhängig von der Erfüllung von Verkehrsaufgaben, nach bestimmten Zeiten oder Kilometerleistungen die Depots für Treibstoffaufnahme und Überholungsarbeiten aufsuchen. Eventuell müssen die Fahrzeuge auch für Stillstandszeiten, die eine bestimmte Dauer überschreiten, in die Depots. Diese zwangsweisen Zeit-Ort-Zuordnungen der Fahrzeuge und die begrenzten Kapazitäten der Fahrzeugdepots müssen bei der Fahrplanung berücksichtigt und in Einklang gebracht werden. Zu gering dimensionierte Depots können Wartezeiten für die Fahrzeuge oder Umwege zu entfernteren Depots bedingen. Neben den technisch notwendigen Überführungs- und Ausfallzeiten vermindern diese Wartezeiten die nutzbare Einsatzzeit der Fahrzeuge noch zusätzlich.

Die Einrichtungen der Fahrzeugdepots sind häufig qualitativ auf bestimmte Fahrzeugtypen ausgerichtet, da sich hierdurch vor allem für die Überholungsarbeiten und Ersatzteillagerung Einsparungen gegenüber universell verwendbaren Depots erreichen lassen. Den Ein-

sparungen durch Zusammenfassung stehen allerdings vermehrte Aufwendungen für die Überführung der Fahrzeuge zu den zentralisierten Depots gegenüber.¹⁾

22) Fahrpersonaldepots

Für das Fahrpersonal muß ebenfalls eine Art Depot zur Verfügung stehen. Diese Depots sind aufgrund der psychischen und physischen Konstitution des Fahrpersonals nach bestimmten Zeitabständen vom Fahrpersonal aufzusuchen. In Analogie zu den Fahrzeugdepots kann man sie als Fahrpersonaldepots bezeichnen. Darunter sind die Wohnungen des Fahrpersonals und gegebenenfalls auch Raststätten u.ä. zu verstehen.

Von einer quantitativen Kapazität kann man nur bei Raststätten sprechen. Bei den Wohnorten entspricht die Zahl des dort wohnenden Fahrpersonals der Zahl der Wohnungen. Als Maß der quantitativen Kapazität könnte man die Anzahl der in einem bestimmten Zeitabschnitt gleichzeitig austeilbaren Mahlzeiten, die Sitzplätze der Restaurants und die Zahl der Übernachtungsmöglichkeiten heranziehen.

Falls die Kapazität einzelner Raststätten zu gering dimensioniert ist, müssen zusätzlich zu gesetzlichen und tarifvertraglichen Zwangsruhezeiten Wartezeiten des Fahrpersonals hingenommen werden. Diese Wartezeiten ziehen zugleich zusätzliche Wartezeiten für die Fahrzeuge und gegebenenfalls für die geladenen Transportobjekte nach sich.

1) vgl. auch Klingensteiner, J., Ebner, E., Der Zugförderungsdienst im Fahrplanjahr 1966/67, in: Die Bundesbahn 40 (1966) S. 991-1005

Eine begrenzte qualitative Kapazität von Fahrpersonaldepots liegt vor, wenn der Kreis der Benutzer der Depots beschränkt ist. Dies kann bei Raststätten der Fall sein und ist bei den Wohnorten immer der Fall.

Der Verkehrsbetrieb ist gezwungen, dem Fahrpersonal nach einer bestimmten Einsatzzeit eine Mindestruhezeit am Wohnort zu gewähren. Diese Zwangsruhezeiten werden durch gesetzliche Vorschriften und tarifvertragliche Vereinbarungen gesichert. Für das Fahrpersonal der Deutschen Bundesbahn ist z.B. eine maximale Ausbleibezeit, d.h. Abwesenheit vom Wohnort, von grundsätzlich 32 Stunden, in Ausnahmefällen von 36 Stunden, vorgeschrieben. Im Güter- und Möbelfernverkehr mit Kraftfahrzeugen sind Mindestfreizeiten von 24 und 30 Stunden innerhalb von zwei Wochen zu ermöglichen. Diese Freizeiten müssen dabei grundsätzlich am Wohnort des Arbeitnehmers gewährt werden.¹⁾ Wegen der begrenzten qualitativen Kapazität der Wohnorte muß bei der Zuordnung des Fahrpersonals zu den Wohnorten die individuelle Zugehörigkeit einer Person zu ihrem Wohnort beachtet werden, es darf also keine globale Zuordnung des Fahrpersonals vorgenommen werden. Die begrenzte qualitative Kapazität der Fahrpersonaldepots bedingt erhebliche Einschränkungen der Einsatzmöglichkeiten des Fahrpersonals.

1) vgl. Bericht über die Verzerrungen der Wettbewerbsbedingungen im binnenländischen Güterverkehr nach Art und Ausmaß und Vorschläge zu ihrer Beseitigung, in: Drucksache IV/1449 des Deutschen Bundestages (im folgenden zitiert als IV/1449), Anlage 1b, S. 37 f.

d) Wege

Wege dienen den Fahrzeugen als Hilfsmittel für die Fortbewegung und verbinden Stationen und Fahrzeugdepots untereinander. Die Wege innerhalb der Stationen und Fahrzeugdepots zählen zu deren Einrichtung und sind nicht Bestandteil des Wegenetzes. Bei Transportverfahren ohne Fahrzeug, wie den Rohrleitungen, treten Objekt und Weg in eine unmittelbare Beziehung zueinander. Die von Verkehrsbetrieben benutzten Wege erfordern fast immer besondere Einrichtungen. Selbst im See- und Luftverkehr kann man wegen der für den modernen Verkehr erforderlichen Navigationshilfen wie Seezeichen, Funkleitstellen u.ä. von See- und Luftwegen sprechen.

Von jedem Fahrzeug wird ein bestimmter Wegabschnitt beansprucht. Ein stehendes Fahrzeug benötigt lediglich einen seiner Länge und Breite ungefähr entsprechenden Abschnitt, während der von einem fahrenden Fahrzeug beanspruchte Wegabschnitt zusätzlich von den Sicherheitsabständen zu vorausfahrenden oder folgenden Fahrzeugen bestimmt wird. Dieser Wegabschnitt kann einerseits geographisch fixiert sein, wie das bei der heute noch vorherrschenden Signaltechnik der Deutschen Bundesbahn der Fall ist. Die Gleise sind dabei in Blockabschnitte, die durch Signale gesichert sind, unterteilt.¹⁾ Jeder Blockabschnitt darf nur von einem Fahrzeug je Gleis belegt sein. Andererseits kann jedem Fahrzeug ein Sicherheitsabstand zu vorausfahrenden und folgenden Fahr-

1) vgl. Happel, O., a.a.O., S. 85

zeugen derart eingeräumt werden, daß der von einem Fahrzeug belegte Wegabschnitt geographisch nicht fixierbar ist, sondern mit dem Fahrzeug wandert.¹⁾

Zur Kapazitätsmessung von Wegen ist es sinnvoll, von geographisch festgelegten längeren Wegabschnitten auszugehen und die Beziehungen zwischen Aufnahmefähigkeit und Fahrzeuggeschwindigkeit zu beachten. Bei geographisch fixierten, starren Sicherheitsabständen erhöht sich die Aufnahmefähigkeit eines längeren Wegabschnitts bei einheitlich erhöhten Fahrzeuggeschwindigkeiten, solange der starre Sicherheitsabstand ausreicht. Sind die Sicherheitsabstände je nach Geschwindigkeit variabel, kann die Zahl der auf einem Wegabschnitt befindlichen Fahrzeuge durch Geschwindigkeits- und Abstandsverringerung erhöht werden. Bestehen keine Überholungsmöglichkeiten, muß die Geschwindigkeit aller auf dem Wegabschnitt befindlichen Fahrzeuge gleich sein. Die Engpaßsituation drückt sich hier also in der verminderten Geschwindigkeit aller Fahrzeuge aus²⁾.

Statt der räumlichen Sicherheitsabstände können die Zeitabstände, die hintereinander fahrende Fahrzeuge beim Passieren eines Punktes mindestens einhalten müssen, betrachtet werden. Für eine exakte Berech-

-
- 1) vgl. Dilly, G., Der wandernde Engpaß und sein Gefolge, in: Eisenbahntechnische Rundschau (1954), S. 1-11 und S. 63-80
 - 2) Die Hamburger Hochbahn berücksichtigt bei der Fahrplanaufstellung die verminderten Geschwindigkeiten in Zeiten großer Verkehrsdichte. vgl. Meier-Ohlert, D.G., Die Berechnung von Linienfahrplänen des öffentlichen Nahverkehrs auf digitalen Rechenanlagen, in: Verkehr und Technik 1962, S. 243-250 und S. 269-272.

nung der erforderlichen Zeitabstände sind zahlreiche Einzelheiten zu berücksichtigen, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann.¹⁾

Sind Wegabschnitte alternativ nur in einer Richtung zu befahren, wie etwa bei eingleisigen Eisenbahnstrecken, müssen Sperrzeiten für sich begegnende Fahrzeuge festgelegt werden. Die Sperrzeiten geben an, wie lange ein Fahrzeug die Strecke für den Gegenverkehr sperrt.²⁾

Reicht die Aufnahmefähigkeit eines Wegabschnitts nicht aus, alle sonst vorteilhaften Fahrzeugzuordnungen aufzunehmen, müssen davon abweichende, weniger günstige Zuordnungen gewählt werden. Tendenziell ergibt sich eine Verzögerung der Fahrzeug- und Transportobjektbewegungen durch herabgesetzte Geschwindigkeiten auf oder vor dem stark beanspruchten Abschnitt. Bei geographisch fixierten Sicherheitsabständen muß gegebenenfalls von einer günstigeren, niedrigeren Geschwindigkeit abgewichen werden. Ist ein bestimmter Auslastungsgrad erreicht, muß in beiden Fällen vor dem ausgelasteten Abschnitt gewartet werden.

Bei Transportverfahren ohne Fahrzeuge wie dem Transport mit Pipelines entfällt der Sicherheitsabstand, da die verschiedenen Aufträge in der Pipeline unmittelbar hintereinander befördert werden. Die Aufnahmefähigkeit des Weges läßt sich deswegen wie bei den starren, geographisch fixierten Blockabschnitten der Eisenbahn

1) vgl. dazu die für Eisenbahnen durchgeführte Untersuchung von Potthoff, G., Verkehrsströmungslehre, Bd. I, Berlin 1962, S. 40 ff.;
Happel, O., a.a.O., S. 79-90;
Dilly, G., Der wandernde Engpaß und sein Gefolge, in: Eisenbahntechnische Rundschau 3(1954) S. 1-11 und S. 63-80;

2) vgl. Happel, O., a.a.O., S.81

durch Erhöhung der Geschwindigkeit steigern, bis die maximal mögliche Geschwindigkeit erreicht ist. Ist ein Wegabschnitt voll ausgelastet, müssen die Transportobjekte auch hier vor dem ausgelasteten Wegabschnitt warten.

e) Fahrpersonal

Der Bestand des Fahrpersonals muß langfristig geplant werden und liegt zumindest für eine Fahrplanungsperiode fest. Eine kurzfristige Erhöhung des einsatzfähigen Personals ist vor allem wegen der meist langen Ausbildungs- und Einarbeitungszeiten, die für das qualifizierte Fahrpersonal erforderlich sind, nicht möglich.¹⁾

Die bei der Fahrplanung zu beachtenden Eigenschaften des Fahrpersonals sind zum großen Teil in gesetzlichen Vorschriften und tarifvertraglichen Vereinbarungen formuliert. Neben den Entlohnungsbedingungen, die die Bewertung von Einsatzalternativen erlauben, sind darin die Grenzbedingungen, die den Bereich der zulässigen Einsatzmöglichkeiten des Fahrpersonals abstecken, angegeben. Außer einer "regelmäßigen" Arbeitszeit sind für die drei deutschen binnenländischen Verkehrszweige höchstzulässige tägliche und wöchentliche Arbeitszeiten vorgeschrieben.²⁾ Bei der Deutschen Bundesbahn darf das Fahrpersonal beispielsweise wöchentlich maximal 56 Stunden eingesetzt werden. Die tägliche Arbeits-

1) Ein Lufthansa-Pilot braucht z.B. 10 Jahre Ausbildung und Erfahrung, bis er Langstrecken befliegen darf. Vgl. Bongert, M., Deutscher Luftverkehr, Bad Godesberg 1967, S. 140;

2) vgl. zu den folgenden Ausführungen IV/1449, a.a.O., Anlage 1b, S. 37 f.

zeit ist durch Sicherheitsbestimmungen nochmals eingeschränkt. Im Güter- und Möbelverkehr sind für einen Fahrer pro Fahrzeug ohne Schlafkabine 126 Einsatzstunden je Doppelwoche zulässig, für zwei Fahrer pro Fahrzeug mit Schlafkabine 165 Stunden je Doppelwoche, je Woche aber nur maximal 90 Stunden. Nach § 15a der Straßenverkehrsordnung sind außerdem Höchstgrenzen für die tägliche Lenkzeit festgelegt.

Die Fahrplanung kann von den Grenzen, die durch die Eigenschaften des Fahrpersonals gesetzt werden, stark beeinflusst werden, falls im Verhältnis zu den Fahrzeugfahrten wenig Fahrpersonal zur Verfügung steht. Auf einen Teil dieser Einflüsse wurde bereits bei der Darstellung der Fahrpersonaldepots eingegangen. Grundsätzlich ist für jeden Fahrpersonaleinsatz darauf zu achten, daß die geplante Einsatzzeit einer Person innerhalb der verschiedenen vorgeschriebenen Zeitgrenzen möglich ist. Weitere Restriktionen des Fahrpersonals sind dann zu beachten, wenn das Fahrpersonal auf bestimmte Fahrzeugtypen spezialisiert ist, also eine Art begrenzter qualitativer Kapazität vorliegt.

2) Nachfragedaten

a) Struktur der Nachfrage

Ein wichtiger Bestandteil der Nachfragestruktur sind die von den Nachfragern determinierten Transportobjekte. Die Transportobjekte sind zunächst durch ihre natürlichen Eigenschaften zu kennzeichnen. Von jedem Transportobjekt müssen insbesondere das Gewicht und das Volumen bekannt sein, um feststellen zu können, wieviel Kapazität der Transportgefäße und der Lagerräume von den Transportobjekten beansprucht würden. Weitere natürliche Eigenschaften bestimmen die qualitativen Ansprüche an Umschlagserichtungen und Fahrzeuge. Auf diese quantitativen und qualitativen Kapazitätsgrenzen braucht nicht mehr näher eingegangen zu werden, da sie bereits bei der Beschreibung der Eigenschaften der Fahrzeuge und Stationen mitbehandelt wurden.

Die natürlichen Eigenschaften können durch besondere, zusätzliche Eigenschaften ergänzt werden: Jedem Transportobjekt sind 2 Ortsangaben für Ablieferungs- und Abnahmeort und 2 Zeitangaben für frühestmöglichen Fahrtbeginn und spätestmögliche Auslieferung beizufordern.

Natürliche und zusätzliche Eigenschaften kennzeichnen zusammen eine gewünschte Verkehrsleistung. Die Gesamtheit der gewünschten Verkehrsleistungen bildet die dem Verkehrsbetrieb gegenüberstehende Nachfrage. Unter dieser Nachfrage ist die Menge gewünschter Verkehrsleistungen zu verstehen, die von dem planenden Verkehrsbetrieb unter Vernachlässigung aller Restriktionen erfüllt werden könnte. Die begrenzten Produktionsmittel erlauben jedoch im allgemeinen nur eine teilweise Erfüllung. Während der zu erfüllende Teil der Nachfrage von der Fahrplanung abhängen kann, ist die gesamte, auf den Verkehrsbetrieb gerichtete Nachfrage im allgemeinen unabhängig von der Fahrplanung.

Nur in Einzelfällen ist die Nachfrage von der Fahrplanung abhängig. Führt die Fahrplanung z.B. zu einem starren Fahrplan, kann dadurch die Nachfrage positiv beeinflusst werden, das Wissen um Fahrten in kurzen, regelmäßigen Zeitabständen, läßt die Nachfrager Verkehrsbetriebe mit starrem Fahrplan bevorzugen.¹⁾ Diese Wirkung hat der Fahrplan normalerweise nicht: Die Nachfrager überprüfen anhand des Fahrplans, ob ihre Vorstellung über Zeit und Ort der Verkehrsleistungen vom

1) vgl. de Graf, W.J., Das Fahrplansystem der niederländischen Eisenbahn, in: Die Bundesbahn, 32 (1958) S. 744; Dübois-Reymond, Starrer Fahrplan bei der Bundesbahn?, in: Die Bundesbahn 37 (1963) S. 876; Gutersohn, A., a.a.O., S. 114

Verkehrsbetrieb erfüllt werden und erteilen dementsprechend ihre Aufträge. Die Nachfrage kann dann unabhängig von der Fahrplanung gesehen werden. Der Fahrplanung ist also, ähnlich wie der industriellen Produktion und Distribution¹⁾, die teilweise oder ganz zu befriedigende Nachfrage vorgegeben.

Bei der Planung vor Auftragsannahme wird erst durch die Planung der Fahrzeugbewegungen festgelegt, welcher Teil der Nachfrage befriedigt werden soll. Die Fahrplanung bestimmt insofern Art und Anzahl der Transportobjekte, die als Daten in die Fahrplanung eingehen, mit.

Wird nach Auftragsannahme geplant, liegt die zu erfüllende Nachfrage fest, die Transportobjekte sind bereits vor der Fahrplanung aus der gesamten Nachfrage ausgewählt worden. Die Anzahl sowie natürliche und zusätzliche Eigenschaften der Transportobjekte sind für die Fahrplanung festliegende Daten.

b) Bestimmungsfaktoren der Nachfrage

Die Nachfrage wird ihrerseits durch allgemein vorhandene, mit Kaufkraft ausgestattete Beförderungsbedürfnisse, durch Maßnahmen der Konkurrenz und durch absatzpolitische Maßnahmen bestimmt. Die absatzpolitischen Maßnahmen sollen die allgemeinen Bedürfnisse in Nachfrage, die sich auf die Leistungen des eigenen Betriebes richtet, umwandeln.²⁾

1) vgl. Alewell, K., Ansätze zu einer Konzeption einer ökonomischen Absatztheorie, Sonderdruck aus Betriebswirtschaft und Marktpolitik, Festschrift für Rudolf Seyffert, Köln und Opladen 1968, S. 4;

2) vgl. Alewell, K., a.a.O., S. 3 f.

Absatzpolitische, auf die Nachfrage einwirkende Maßnahmen umfassen Produktgestaltung, Gestaltung der Absatzmethoden, Werbung und Preispolitik. Diese Begriffe sind vorwiegend anhand der Verhältnisse von Industriebetrieben entwickelt worden, sie bedürfen deswegen für Verkehrsbetriebe einer Umformung und Interpretation. Dabei soll die Fahrplanung als Untersuchungsobjekt isoliert bleiben und nicht ganz oder teilweise in die Begriffe hineininterpretiert werden.

Die Produktgestaltung umfaßt dementsprechend lediglich die durch Investitionen festgelegte Ausstattung der Fahrzeuge und den durch die Personalbestandsplanung mitbestimmten Service des Begleitpersonals. Die zeitlichen und örtlichen Merkmale, die den Objekten als zusätzliche Nachfragedaten zuzuordnen sind, stellen keine absatzpolitischen Mittel des Verkehrsbetriebes dar, da sie allein von den Nachfragern bestimmt werden.

Unter der Absatzmethode kann man die durch eigene Investitionen bestimmte Anzahl, Art und Lage von Stationen und zusätzlichen Vermittlungsbüros ansehen.

Werbung und Preispolitik haben für Verkehrsbetriebe die gleiche Funktion wie für Industrie- oder Handelsbetriebe. Theoretisch ist es denkbar, daß Werbung und Preispolitik zusammen mit der Fahrplanung und in gegenseitiger Abstimmung festgelegt werden. Bei dieser Sichtweise richten sich die drei Maßnahmenkomplexe auf eine nur durch Produktgestaltung und Absatzmethode beeinflusste Nachfrage. Es erscheint jedoch realistischer, davon auszugehen, daß Werbung und Preispolitik bereits langfristig vor der Fahrplanung festliegen und die der Fahrplanung vorgegebene Nachfrage mitgeprägt haben.

Bei der Werbung gilt die Annahme der Langfristigkeit vor allem für die großangelegte, allgemeine Werbung für den Gesamtbetrieb. Für solche Werbemaßnahmen müssen Werbekonzeptionen geplant werden, die für längere Zeit gültig sind. Eine Art Werbung nach der Fahrplanung, für deren Ergebnisse, erfolgt demgegenüber mit der Information durch den veröffentlichten Fahrplan. Die Tatsache und das Ausmaß der Fahrplanveröffentlichung liegen aber zumeist bereits vor der Fahrplanung fest und können insofern bei der Planung antizipiert werden.

Die sowohl privaten als auch öffentlichen Verkehrsbetrieben auferlegten, insbesondere im Linienverkehr gültigen Tarifpflichten¹⁾ bedingen eine starre, langfristige festliegende Preispolitik. Hierfür sind vor allem die Verfahren der Tarifbeantragung und -genehmigung verantwortlich. Die Deutsche Bundesbahn, die Sachverständigenkommission des Kraftverkehrs und die Frachtenausschüsse des Binnenschiffsverkehrs müssen Tarifvorschläge beim Bundesverkehrsministerium einreichen. Das Bundesverkehrsministerium muß dann im Einvernehmen mit dem Bundeswirtschaftsministerium die Tarife genehmigen und erlassen. Die Tarifpflicht verhindert zudem

1) vgl. § 6 des Allgemeinen Eisenbahngesetzes vom 29.3.1951 i.d.F. vom 1.8.1961; § 6 Eisenbahnverkehrsordnung (EVO) vom 8. September 1938; § 16 Bundesbahngesetz (BundesbahnG) vom 29. März 1951 i.d.F. vom 1. August 1961; §§ 20, 20a, 21, 21a, 21b, 22 Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) vom 1. Okt. 1952 i.d.F. v. 8.6.1964; § 39 Personenbeförderungsgesetz (PBefG) vom 21.3.1961 i.d.F. vom 25.8.1965; vgl. auch Lechner, Verkehrsbetriebslehre, a.a.O., S. 58-61; Predöhl, A., Verkehrspolitik, Göttingen 1964, S. 207 ff., S. 274 ff., S. 322 ff.

eine Anpassung der Tarife an die Erfordernisse der Fahrplanung, da den Verkehrsbetrieben auferlegt wird, grundsätzlich keine Begünstigungen einzelner Nachfrager oder Gebiete zuzulassen. Ausnahmen von diesem Grundsatz sind nicht nach den Gesichtspunkten der Fahrplanung möglich, sie werden vielmehr aus übergeordneten wirtschafts- und sozialpolitischen Gründen festgelegt.¹⁾

Im Internationalen Verkehr werden die Preise zum großen Teil ebenfalls durch staatlich oder zwischenbetrieblich beeinflusste Preisbildungsverfahren festgelegt. Längerfristig gültige zwischenbetriebliche Absprachen werden beispielsweise auf Frachtenkonventionen des Binnenschiffsverkehrs und auf Schiffahrtskonferenzen des Seeverkehrs getroffen. Im Luftverkehr hat die IATA die Aufgabe, ein gleichzeitig zwischenbetrieblich und staatlich bestimmtes einheitliches Tarifsysteem zu entwickeln. Es wird zwischen den Luftverkehrsbetrieben ausgehandelt und muß anschließend noch die Billigung der Regierungen der Länder, in denen die Luftverkehrsgesellschaften ihren Sitz haben, finden.

Im binnenländischen und internationalen Gelegenheitsverkehr ist die Preispolitik noch am beweglichsten, die Preise werden hier jedoch bei Auftragsannahme festgelegt, so daß sie für die nach Auftragsannahme einsetzende Fahrplanung ein Datum sind.

Die Preise liegen also im wesentlichen vor der Fahrplanung fest. Sie beeinflussen einerseits die Zahl der Aufträge oder die von der Fahrplanung vor Auftragsannahme auszunutzende Nachfrage und können andererseits als festliegender Bewertungsmaßstab für Fahrplanungsalternativen dienen.

1) Als Ausnahme könnten die von der Deutschen Bundesbahn durchgeführten Sonderpreisaktionen für bestimmte Personengruppen angesehen werden. Sie dienen der Werbung und der gewinnsteigernden Ausnutzung der Überkapazität außerhalb der Hauptreisezeiten.

C Die Fahrplanung als Ablaufplanung im Bereich der Leistungserstellung des Verkehrsbetriebes

I. Einordnung der Fahrplanung in die betriebliche Gesamtplanung

Das Fahrplanungsproblem ist durch die Abgrenzung des Entscheidungsfeldes der Fahrplanung gegen alle übrigen Planungsprobleme des Verkehrsbetriebes isoliert worden. Es wird also nur die Planung eines Teilbereichs untersucht, ohne die Probleme einer Abstimmung mit anderen bereichsbezogenen Teilplanungen¹⁾ im Rahmen einer Gesamtplanung zu berücksichtigen.

Im folgenden soll die Fahrplanung in die Gesamtplanung eines Betriebes eingeordnet werden. Auf diese Weise läßt sich das Fahrplanungsproblem mit den üblichen Begriffen der Betriebswirtschaftslehre umschreiben, zugleich können die Gemeinsamkeiten und Unterschiede hervorgehoben werden, die eine Übertragung von Forschungsergebnissen aus anderen speziellen Betriebswirtschaftslehren ermöglichen oder verhindern.

Die bisher durchgeführte Abgrenzung und Analyse des Fahrplanungsproblems hat gezeigt, daß im Bereich der Fahrplanung die Leistung des Verkehrsbetriebes, die Ortsveränderung von Transportobjekten, entsteht. Die Fahrplanung bezieht sich demnach auf die Leistungserstellung oder auf einen Teil der Leistungserstellung des Verkehrsbetriebes.

Die Leistungserstellung des Verkehrsbetriebes ist am besten in Anlehnung an die Terminologie der Industriebetriebswirtschaftslehre zu kennzeichnen. Im Industriebetrieb werden Betriebsmittel, Arbeit und Werkstoffe eingesetzt. Die Werkstoffe werden durch Formveränderung,

1) vgl. Hahn, D., Planung als Instrument der Unternehmensführung, in: Unternehmensführung auf neuen Wegen, Hrsg. R.W. Stöhr, Wiesbaden 1967, S. 193 und 197

Substanzveränderung, Herstellen und Lösen von Verbindungen zu Leistungen umgeformt.¹⁾ Im Verkehrsbetrieb werden statt der Werkstoffe Transportobjekte eingesetzt. Während die Werkstoffe meist im Eigentum der Industriebetriebe stehen, stehen die Transportobjekte in fremdem Eigentum. Anstelle materieller Veränderungen nimmt der Verkehrsbetrieb lediglich Ortsveränderungen an den Transportobjekten vor.²⁾

Die Planung der Leistungserstellung von Betrieben kann in eine Leistungsprogrammplanung i.w.S., eine Leistungsprogrammplanung i.e.S., eine Bereitstellungsplanung und eine Ablaufplanung eingeteilt werden.³⁾ Die Leistungsprogrammplanung i.w.S. erfolgt langfristig und legt die Grundrichtung der Leistungserstellung für eine längere Zeit fest. Die Leistungsprogrammplanung i.e.S. erfolgt dagegen kurzfristiger und legt die Leistungen nach Art und Menge detailliert fest. Die Bereitstellungsplanung hat sicherzustellen, daß alle für den Ablauf der Leistungserstellung notwendigen Einsatzfaktoren rechtzeitig am richtigen Ort bereitstehen. Die Ablaufplanung erfaßt den zeitlich-örtlichen Vollzug der Leistungserstellung. Es ist nun zu prüfen, wie die Fahrplanung in dieses Planungssystem einzuordnen ist.

Die Ergebnisse der Planung des Leistungsprogramms i.w.S. sind Voraussetzung für die Investitionsplanung, die abgeschlossene Investitionsplanung wiederum Voraussetzung für die Fahrplanung. Die Leistungsprogrammplanung i.w.S. ist also nicht ein Teil, sondern eine der Voraussetzungen der Fahrplanung.

1) vgl. Diederich, H., a.a.O., S. 42

2) vgl. Diederich, H., a.a.O., S. 43

3) vgl. zu dieser Einteilung und der Definition der Begriffe:

Ellinger, T., a.a.O., S. 17;

Hahn, D., a.a.O., S. 205.

Die zu befördernden Transportobjekte einschließlich der Orts- und Zeitangaben für Abgangs- und Bestimmungsorte kann man als verkehrsbetriebliches Leistungsprogramm i.e.S. bezeichnen.

Liegen für die Fahrplanung nach Auftragsannahme mehr Aufträge vor, als erfüllt werden können oder sollen, muß in Abstimmung mit der Fahrplanung eine Auswahl aus den Aufträgen vorgenommen werden. Die ausgewählten Aufträge stellen dann das Leistungsprogramm i.e.S. dar, das bei dieser Sichtweise Voraussetzung der Fahrplanung wäre. Wegen der bei der Auswahl erforderlichen Abstimmung kann man diese Bestimmung des Leistungsprogramms i.e.S. aber auch als Bestandteil der Fahrplanung ansehen. Können alle vorliegenden Aufträge angenommen werden, ohne daß dabei die Zielerfüllung beeinträchtigt wird, ist eine Programmplanung nicht mehr möglich und notwendig. Die Fahrplanung nach Auftragsannahme richtet sich dann nicht nach einem geplanten, sondern nach einem von der Nachfrage vorgegebenen Leistungsprogramm i.e.S..

Bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme kann nicht von einem vorgegebenen Leistungsprogramm i.e.S. ausgegangen werden, da erst durch die Fahrplanung eine Auswahl der durch Objekt, Zeit- und Ortsangaben gekennzeichneten Verkehrsleistungen erfolgt. Das Leistungsprogramm i.e.S. wird hier also durch die Fahrplanung festgelegt, es kann einerseits als Folge, andererseits auch als Bestandteil der Fahrplanung vor Auftragsannahme angesehen werden.

Die Ergebnisse der Bereitstellungsplanung sind offensichtlich Voraussetzung für die Fahrplanung, die ohne Kenntnis der Einsatzorte und -zeiten der Betriebsmittel und Arbeitskräfte nicht begonnen werden kann. Andererseits müssen die Ergebnisse der Fahrplanung in Form von gewünschten Einsatzorten und -zeiten, an die die Bereitstellungsplanung anknüpfen kann, vorliegen.

Dieser Zusammenhang zwingt eigentlich zu einer simultanen Bereitstellungs- und Fahrplanung. Dies würde letztlich dazu führen, daß die Bereitstellungsplanung in eine wesentlich umfangreichere Fahrplanung einbezogen werden müßte, für die dann jedoch wiederum das gleiche Abstimmungsproblem entstünde. Um eine derartige Ausweitung zu vermeiden, muß davon ausgegangen werden, daß vor oder nach der Fahrplanung eine Bereitstellungsplanung erfolgt, deren Ergebnisse sicherstellen, daß zu Beginn der Fahrplanungsperiode Betriebsmittel und Arbeitskräfte an den Einsatzorten bereitstehen. Auf die Ermittlung der richtigen bzw. optimalen Einsatzorte muß dabei verzichtet werden. Die innerhalb der Fahrplanungsperiode durchzuführenden Leerfahrten zu den Abfahrtsorten für Nutzfahrten sollten demgegenüber nicht als Gegenstand einer Bereitstellungsplanung angesehen werden, sie müssen vielmehr im Gesamtzusammenhang einer einheitlichen Fahrplanung gesehen werden.

Die Ablaufplanung im Bereich der Leistungserstellung und die Fahrplanung weisen die gleichen Merkmale auf. In beiden Fällen geht es um die Planung des zeitlich-örtlichen Vollzuges der Leistungserstellung.

Die Fahrplanung ist also zusammenfassend als eine Ablaufplanung im Bereich der Leistungserstellung zu kennzeichnen, die zugleich Elemente einer kurzfristigen Programmplanung enthalten kann.

II. Zur Frage der Anwendbarkeit von Planungsmodellen aus der Industrie

Im Zusammenhang mit der soeben erfolgten Kennzeichnung ist die Frage zu stellen, ob zwischen der Fahrplanung und der Planung des Produktionsablaufs von Industriebetrieben soviel Ähnlichkeiten bestehen, daß eine unmittelbare Übertragung der für Industriebetriebe entwickelten Planungsmodelle möglich ist.

Eine nähere Betrachtung zeigt, daß eine Reihe von Unterschieden besteht. Während im Industriebetrieb der zeitliche Durchfluß der Produktionsaufträge durch die verschiedenen ortsfesten Werkstätten und Arbeitsplätze zu planen ist, sind im Verkehrsbetrieb die zeitlich-örtlichen Zuordnungen mehrerer Gruppen von Aktionsparametern zu planen. Neben dem Durchfluß von Transportobjekten sind Bewegungen und Ruhezeiten von Aggregaten, Transportgefäßen, Aggregat- und Begleitpersonal in einem Netz aus Stationen, Depots und Wegen durchzuführen und aufeinander abzustimmen.

Weiterhin besteht im Verkehrsbetrieb ein sehr enger Zusammenhang zwischen dem Produktionsprozeß und den Übernahme- und Übergabehandlungen am Transportobjekt, die man mit den Distributionstätigkeiten am Produkt der Industriebetriebe vergleichen könnte. Der physische Absatz in Industriebetrieben läßt sich demgegenüber tendenziell stärker vom Produktionsprozeß lösen.

Vergleicht man auftragsorientierte¹⁾ Industriebetriebe mit Verkehrsbetrieben, die die Fahrplanung nach Auftragsannahme durchführen, sind die Unterschiede nur gering. Ist in Industrie- oder Verkehrsbetrieben der Zeitraum zwischen Übernahmezeitpunkt des Auftrages oder des Transportobjektes und dem Übergabetermin der fertigen Leistung größer als der technische Zeitbedarf für

1) vgl. Gutenberg, E., a.a.O., S. 197

Gutenbergs Kennzeichnung auftragsorientierter Betriebe als Betriebe, die keine lagerfähigen Produkte erzeugen, erscheint unzweckmäßig. Sinnvoller ist wohl auch für Industriebetriebe die Einteilung nach dem Beginn der Prozeßplanung: Wird nach Auftragsannahme geplant, sollte man von auftragsorientierten Betrieben, wird vor Auftragsannahme geplant, von marktorientierten Betrieben sprechen. Diese Einteilung läßt sich auf Industrie- und Verkehrsbetriebe anwenden. Zudem trägt sie der Tatsache Rechnung, daß auch im Auftrag gefertigte Produkte gelagert werden können.

den Prozeß der Leistungserstellung, läßt sich sowohl das fertige Produkt als auch das beförderte Transportobjekt lagern. Leistungsprozeß und Absatzhandlung lassen sich also in beiden Fällen durch Lagerung trennen. Industriebetriebe können die Rohstoffe für den Auftrag außerdem vor dem Prozeß lagern, ebenso wie Verkehrsbetriebe das Transportobjekt vor dem Transportvorgang lagern können. Allerdings lagern Industriebetriebe meist eigene, bereits vor Auftragsannahme vorhandene Rohstoffe, während Verkehrsbetriebe fremde Objekte lagern. Die Verkehrsbetriebe können daher nicht schon nach Auftragsannahme, sondern erst nach Übergabe des Transportobjekts mit dem Transport beginnen. Der Planungsspielraum für die Fahrplanung wird dadurch tendenziell kleiner als der Planungsspielraum für die Prozeßplanung von Industriebetrieben.

Produziert ein Industriebetrieb für den anonymen Markt, also ohne daß konkrete Aufträge vorliegen, hat er noch mehr Möglichkeiten für eine Trennung zwischen Produktionsprozeß und Absatz. Er kann frühzeitig hergestellte Produkte auf Lager nehmen und Produktionsprozeß und Absatzhandlungen am Produkt voneinander abheben.

Für einen Verkehrsbetrieb, der vor Auftragsannahme plant, besteht eine solche Möglichkeit nicht. Für ihn wäre es sinnlos, Fahrzeugbewegungen vorzuziehen, um spätere Nachfragespitzen besser abtragen zu können. Er muß sich mit den Fahrzeugbewegungen möglichst genau an die Nachfrage anpassen, da er darauf angewiesen ist, das Transportobjekt vom Nachfrager zu erhalten. Beginnt er vor dem Zeitpunkt der Nachfrage, erhält er keine Transportobjekte und kann keine Verkehrsleistung erbringen. Eine Produktion im voraus, auf Vorrat ist insofern bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme unmöglich, Abläufe und Absatzhandlungen hängen dadurch zwangsläufig viel stärker zusammen als in einem Industriebetrieb.¹⁾

1) vgl. Diederich, H., a.a.O., S. 45 f.

Wegen der Unterschiede zwischen der Prozeßplanung der Industrie und der Fahrplanung von Verkehrsbetrieben sind die Verfahren zur Lösung von Problemen der industriellen Prozeßplanung nicht auf die Fahrplanung übertragbar. Ablaufplanung bei Fließband- oder Werkstattfertigung und Festlegung von Losgrößen sind beispielsweise spezielle Problemstellungen aus dem Bereich der Industrie.¹⁾ Eine Übertragung der dafür entwickelten Lösungsverfahren auf die Fahrplanung von Verkehrsbetrieben ist nicht oder nur gewaltsam möglich. Die Fahrplanung sollte deswegen als arteigenes Problem der Verkehrsbetriebe gesehen werden, um Fehler durch falsche Analogieschlüsse zu vermeiden. Gegen einen anschließenden Vergleich der Prozeßplanungen beider Betriebsarten ist nichts einzuwenden. Ein solcher Vergleich soll in dieser Arbeit jedoch nicht vorgenommen werden.²⁾

-
- 1) vgl. z.B. Gutenberg, E., a.a.O., S. 197 ff.;
- 2) vgl. zur Ablaufplanung der Industrie: Brusberg, H., Der Entwicklungsstand der Unternehmensforschung mit besonderer Berücksichtigung der Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden 1965, S. 173 ff.;
- Churchman, Ackoff, Arnoff, Operations Research, 2. Aufl., Wien, München 1964, S. 409 ff.;
- Hoss, K., Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden, Würzburg, Wien 1965;
- Kern, W., Optimierungsverfahren in der Ablauforganisation, Essen 1967, S. 151 ff.;
- Mensch, G., Ablaufplanung, Köln, Opladen 1968;
- Sasieni, Yaspan, Friedman, Methoden und Probleme der Unternehmensforschung, Würzburg, Wien 1965, S. 256 ff.;
- Schweitzer, M., Probleme der Ablauforganisation in Unternehmungen, Berlin 1964;
- Vazsonyi, A., Die Planungsrechnung in Wirtschaft und Industrie, Wien, München 1964, S. 339-419.

D. Zielanalyse

I. Der formale Aufbau eines Zielsystems

Innerhalb der durch die Daten gegebenen Grenzen sind die Aktionsparameter zunächst beliebig festzulegen. Aus diesen vielen möglichen Kombinationen von Aktionsparametern oder Alternativen soll diejenige herausgefunden werden, die für den Verkehrsbetrieb am günstigsten ist, die also am besten zur Erfüllung der vom Verkehrsbetrieb verfolgten Ziele beiträgt. Die Alternativen sind daher mit den durch die Ziele gegebenen Maßstäben zu beurteilen bzw. zu bewerten. Die am höchsten bewertete Alternative kann dann ausgewählt und als Ergebnis der Planung in den Plan aufgenommen werden.

Es soll nun nach zweckmäßigen Fahrplanungszielen gesucht werden. Will man nicht irgendwelche Ziele willkürlich vorgeben, ist eine ausführliche Zielanalyse erforderlich. Als erstes soll der formale Aufbau der Ziele untersucht werden.

Die Ziele der Betriebe werden von den Interessen der verschiedenen, direkt oder indirekt mit dem Betrieb verbundenen Personen und deren Möglichkeiten, ihren Einfluß geltend zu machen, bestimmt. Theoretisch gehen die Motive aller maßgeblich Beteiligten in die Ziele ein. Vereinfachend kann unterstellt werden, daß immer nur ganze Gruppen einflußreich genug sind, auf Ziele einzuwirken, wobei es durchaus sein kann, daß das Gruppeninteresse von starken Einzelpersönlichkeiten geprägt wird. Man kann folgende Gruppen unterscheiden: Eigentümer, Manager, Arbeitnehmer, Gläubiger, Lieferanten, Staat und Gemeinden, Nachfrager und Konkurrenten.¹⁾

1) vgl. auch Cassier, S.C., Wer bestimmt die Geschäftspolitik der Großunternehmen?, Frankfurt 1962, S. 158 ff.

Je nach der Situation des Einzelfalles wird der Einfluß der Gruppen unterschiedlich sein. Im allgemeinen geht der stärkste Einfluß von Eigentümern und Managern aus, weniger einflußreich sind Konkurrenten und Abnehmer, die jedoch in öffentlichen Betrieben mit Hilfe des Staates Einfluß gewinnen können.

Die Vielzahl der beeinflussenden Gruppen bedingt im allgemeinen auch eine Vielzahl von Zielen, die untereinander auf verschiedene Weise zusammenhängen. Die Betriebe richten sich also nicht nach einem Ziel, sondern nach mehreren Zielen, die zu einem Zielsystem oder einer Zielkombination verknüpft sind.¹⁾

Die Beziehungen der einzelnen Ziele untereinander können neutral, komplementär oder konkurrierend sein.²⁾ Man spricht von neutralen Beziehungen, wenn die Verfolgung von Zielen ohne gegenseitige Beeinträchtigung oder Förderung möglich ist. Komplementäre Beziehungen sind gegeben, wenn das Ausmaß der Zielerfüllung eines Ziels einseitig oder wechselseitig von anderen Zielen gefördert wird. Liegen konkurrierende Beziehungen vor, führt die Erfüllung der konkurrierenden Ziele zu einseitiger oder gegenseitiger Beeinträchtigung, so daß Zielkonflikte³⁾ entstehen.

-
- 1) vgl. Bidlingmaier, J., Unternehmerziele und Unternehmerstrategien, Wiesbaden 1964, im folgenden zitiert als "Unternehmerziele"; Heinen, E., Das Zielsystem der Unternehmung, Wiesbaden 1966, im folgenden zitiert als "Zielsystem", S. 28-48; Schmidt-Sudhoff, U., Unternehmerziele und unternehmerisches Zielsystem, Wiesbaden 1967, S. 43; Strasser, H., Zielbildung und Steuerung der Unternehmung, Wiesbaden 1966, S. 11 f;
 - 2) vgl. z.B. Bidlingmaier, J., Unternehmerische Zielkonflikte und Ansätze zu ihrer Lösung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft 38. Jg. (1968), S. 158 ff;
 - 3) vgl. Bidlingmaier, J., Unternehmerische Zielkonflikte und Ansätze zu ihrer Lösung, a.a.O.

Dies aus den Interessen der beteiligten Gruppen abgeleitete Zielsystem reicht zur Steuerung des Betriebes im allgemeinen nicht aus, da sich die Auswirkungen der in den Teilbereichen des Betriebes getroffenen Entscheidungen auf die Erfüllung des Zielsystems nicht abschätzen lassen. Das Zielsystem ist zu wenig auf die Verhältnisse im Betrieb ausgerichtet. Die durch die Entscheidungen festzulegenden Aktionsparameter können daher nicht bewertet und ausgewählt werden.

Das Zielsystem muß deshalb durch operationale Ziele für die Teilbereiche ergänzt werden. Operational sind Ziele dann, wenn sie den entscheidenden Personen eindeutig und verständlich vorgegeben werden und die Entscheidungen nach diesen Zielen bewertet werden können.¹⁾

Die Maßgeblichkeit des Zielsystems kann nur dann gesichert werden, wenn die ergänzenden, operationalen Ziele zugleich in komplementärer, untergeordneter Beziehung zum ursprünglichen Zielsystem stehen. Man kann insofern das ursprüngliche Zielsystem als System von Oberzielen kennzeichnen, das durch operationale Unterziele zu ergänzen ist. Es entsteht dann ein hierarchisch gegliedertes Zielsystem, in dem die Unterziele ein Mittel zur Erfüllung der Oberziele darstellen.²⁾

1) vgl. Engels, W., a.a.O., S. 47 'Allgemeine Prinzipien müssen durch spezielle Zielfunktionen in der Weise ersetzt werden, daß die Entscheidung zwar unverändert bleibt, das Kalkül jedoch erleichtert wird.'
Albach, H., Entscheidungsprozeß und Informationsfluß in der Unternehmensorganisation, in: Organisation, TFB/Handbuchreihe, 1. Band, Hrsg. G. Schnauffer und K. Agthe, Berlin und Baden Baden 1961, S. 357 'Ein Ziel wird dann operational genannt, wenn es eindeutig in verständlichen Größen ausgedrückt werden kann.';

2) vgl. Heinen, E., Zielsystem, a.a.O., S. 102 ff.

Die Unterziele müssen also 2 Anforderungen genügen, sie müssen sowohl operational als auch komplementär zum System der Oberziele sein. Meist wird man beiden Anforderungen nicht vollständig nachkommen können und es muß ein Kompromiß gefunden werden.

Der Kompromiß kann sowohl den Inhalt, als auch den formalen Aufbau betreffen. Der Inhalt des Unterziels der Fahrplanung soll anschließend aus den noch zu untersuchenden Oberzielen der Verkehrsbetriebe abgeleitet werden. Der zweckmäßige formale Aufbau des Unterziels kann bereits an dieser Stelle diskutiert werden.

Das Unterziel könnte als ein einziges, zu maximierendes Ziel formuliert werden. Die unbegrenzte Verfolgung eines einzigen Zieles kann jedoch dazu führen, daß das Unterziel konkurrierende Oberziele zu stark beeinträchtigt, so daß die Komplementarität zu den Oberzielen nicht mehr genügend gewahrt ist. Versucht man andererseits, die nicht-operationalen Oberziele im Unterziel auf einen einzigen Wertmaßstab zu reduzieren,¹⁾ so wird sich keine Operationalität erzielen lassen, denn die Zusammenfassung nicht-operationaler Oberziele zu einem Unterziel kann nicht zu einem operationalen Ziel führen.

Der beste Kompromiß zwischen Operationalität und Komplementarität eines Unterziels läßt sich wohl durch die Festlegung eines Maximierungszieles und die Berücksichtigung der übrigen Ziele in Form von Mindestanforderungen erreichen. Heinen bezeichnet sol-

1) vgl. Gäfgen, G., Theorie der wirtschaftlichen Entscheidung, Tübingen 1963, S. 137 f.

che Anforderungen als Nebenbedingungen vom Typ B,¹⁾ Dieter Schneider spricht von Zielnebenbedingungen.²⁾ Zum Unterschied zu den Nebenbedingungen vom Typ A, die technisch unmögliche und gesetzlich unzulässige Lösungen ausschließen, beruhen die Nebenbedingungen vom Typ B auf freiwilligen Zielentscheidungen. Sie geben an, welche Alternativen wegen zu starker Beeinträchtigung der in den Nebenbedingungen erfaßten Ziele unerwünscht oder welche Alternativen unabhängig vom Maximierungsziel erwünscht sind.

II. Oberziele von Verkehrsbetrieben

1) Das Gewinnziel als Ziel privater und öffentlicher Verkehrsbetriebe

In der neueren Literatur zum Zielproblem werden eine Reihe von möglichen Unternehmenszielen genannt. Heinen nennt beispielsweise: Gewinnstreben, Umsatzstreben, Wirtschaftlichkeitsstreben, Sicherung des Unternehmenspotentials, Sicherung der Liquidität, Unabhängigkeitsstreben, Prestigestreben, Machtstreben, ethische und soziale Bestrebungen.³⁾

Unabhängigkeits-, Prestige- und Machtstreben sowie ethische und soziale Bestrebungen gehören mehr zu den Motiven der zielsetzenden Personen und müssen erst noch in Ziele, die dem Betrieb vorgegeben werden können,

1) vgl. Heinen, E., Zielsystem, a.a.O., S. 54 f.

2) vgl. Schneider, D., Zielvorstellungen und innerbetriebliche Lenkungspreise in privaten und öffentlichen Unternehmungen, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 1966, S. 260 f.

3) vgl. Heinen E., Zielsystem, a.a.O., S. 69 ff.; vgl. auch den Zielkatalog bei Schmidt-Sudhoff, U., a.a.O., S. 43 ff.

umgesetzt werden. Andere Ziele wie Umsatzstreben, Wirtschaftlichkeitsstreben oder Sicherung der Liquidität reichen nicht zur Steuerung des gesamten Betriebes aus, da es keine Oberziele, sondern Unterziele oder unvollständige Ziele sind.

Von den allgemeinen Zielen wie Gewinnstreben, Sicherung des Unternehmenspotentials ist dem Gewinnstreben eine dominierende Rolle zuzuweisen.¹⁾ Es ist Voraussetzung für die Erzielung vieler im Bereich der Motivation liegenden Ziele, und zahlreiche Ziele dienen letztlich der Gewinnerzielung.

Die maßgeblichen Interessentengruppen sind in irgendeiner Form an Gewinnen interessiert. Die Eigentümer streben Gewinn als Einkommen oder als Mittel zur Verfolgung sonstiger Ziele an. Die Manager verfolgen einerseits die Interessen der Eigentümer, ihnen dient der Gewinn jedoch zugleich als Maßstab ihres persönlichen Erfolges. Je besser die Ertragslage des Betriebes ist, umso geringer ist für Gläubiger und Lieferanten das Rückzahlungsrisiko für die gewährten Darlehen und Lieferantenkredite. Für die Lieferanten verbessern sich zugleich die Absatzchancen, wenn die Geschäfte ihres Abnehmers gewinnbringend sind. Der Staat ist wegen der gewinnabhängigen Steuern an Gewinnen des Betriebes interessiert. Bei den Arbeitnehmern führt das besondere Interesse an hohen Löhnen zwar zu einem teilweisen Zielkonflikt mit dem Gewinnziel,

1) vgl. zur Bedeutung des Gewinnzieles, Heinen, E., Zielsystem, a.a.O., S. 44, S. 82 ff.; Bidlingmaier, J., Unternehmerziele, a.a.O., S. 92 ff.; Schmidt-Sudhoff, a.a.O., S. 102 ff.

hohe Erträge und niedrige Aufwendungen, ausgenommen die Löhne, sind aber auch für sie günstig, da hohe Gewinne eine gewisse Gewähr für die Erhaltung der Arbeitsplätze bieten.

Das Gewinnziel stimmt aber nur in dieser allgemeinen Form mit den Gewinninteressen der Gruppen überein. Die Vorstellungen über Ausmaß und Bezugsperiode¹⁾ des Gewinns können stark voneinander abweichen. Während einige Gruppen oder Untergruppen maximale Gewinne in einer kurzfristigen Bezugsperiode bevorzugen, können andere Gruppen kurzfristig einen geringeren Gewinn anstreben, um die langfristige Gewinnerzielung zu fördern. Noch größere Meinungsverschiedenheiten können bezüglich der Gewinnverwendung - Ausschüttung oder Rücklage - bestehen.

Die soeben getroffenen Aussagen gelten zunächst nur für private Betriebe. Untersuchungen über Verkehrsbetriebe dürfen aber nicht die Tatsache außeracht lassen, daß sich ein großer Teil der Verkehrsbetriebe im Mehrheitsbesitz des Staates und der Gemeinden befindet. Der verstärkte staatliche oder kommunale Einfluß kann sich auf das Zielsystem der öffentlichen Verkehrsbetriebe auswirken. Aber auch in öffentlichen Verkehrsbetrieben spielt das Gewinnziel eine große Rolle, wenn es auch durch gemeinwirtschaftliche Ziele zu ergänzen ist. Zunächst soll die Bedeutung des Gewinnziels gezeigt werden.

In öffentlichen Betrieben streben die Manager häufig aus eigenem Antrieb Gewinn an, da der Gewinn als Maßstab für ihren eigenen Erfolg dienen kann. Vor allem

1) vgl. Schmidt-Sudhoff, a.a.O., S. 111 ff.;

aber versuchen die Manager öffentlicher Betriebe, Gewinne anzustreben, um Subventionen, die sie von den subventionierenden Instanzen abhängig machen würden, zu vermeiden.¹⁾

Staat und Gemeinden sind ebenfalls daran interessiert, daß die öffentlichen Betriebe Gewinne erzielen und evtl. auch ausschütten, wenigstens aber ihren Aufgaben ohne Subventionen nachkommen können. Insbesondere in den für öffentliche Verkehrsbetriebe relevanten Gesetzen werden deswegen Gewinnziele formuliert. Die Bundesbahn ist beispielsweise so zu führen, "daß die Erträge die Aufwendungen einschließlich der erforderlichen Rückstellungen decken". Außerdem sei eine angemessene Verzinsung des Eigenkapitals anzustreben.²⁾ In den Gemeindeordnungen wird ebenfalls ausdrücklich ein Gewinnziel formuliert. In § 76 Abs. 2 der Gemeindeordnung Nordrhein-Westfalen heißt es z.B.: "Der Jahresgewinn der wirtschaftlichen Unternehmen als Unterziel der Erträge und Aufwendungen soll so hoch sein, daß außer den für die technische und wirtschaftliche Fortentwicklung des Unternehmens notwendigen Erweiterungs- und sonstigen offenen Rücklagen mindestens eine marktübliche Verzinsung des Eigenkapitals erwirtschaftet wird."³⁾

Das von der öffentlichen Hand verfolgte Gewinnziel ist wie das Gewinnziel privater Betriebe noch nicht operational. Es wären erst noch Begriffe wie "erforderlich", "notwendig", "angemessen" oder "marktüblich" zu klären. Diese Begriffe sind auch in der

-
- 1) vgl. Witte, E., Die öffentliche Unternehmung im Interessenkonflikt, Berlin 1966, S. 77 ff.;
 - 2) § 28 Abs. 1 BundesbahnG;
 - 3) vgl. Surén, Die Gemeindeordnungen in der Bundesrepublik, Bd. 2, Gemeindewirtschaftsrecht, Köln, Berlin, München, Bonn, 1960

Praxis ungeklärt, die Auslegung bleibt den Geschäftsleitungen der öffentlichen Betriebe überlassen. Die Geschäftsleitungen werden dabei ihre eigenen Gewinnvorstellungen weitgehend durchsetzen können.¹⁾ Soweit erkennbar unterscheiden sich die Gewinnziele privater und öffentlicher Verkehrsbetriebe also nicht wesentlich. Dies gilt insbesondere für Verkehrsbetriebe, die Verluste erzielen und deswegen besonders intensiv nach Gewinnen streben. Lediglich weitere, konkurrierende Ziele werden dann das Gewinnstreben einschränken können.

2) Das Gemeinwirtschaftlichkeitsziel öffentlicher Verkehrsbetriebe

Während bei privaten Verkehrsbetrieben das Gewinnziel eindeutig im Vordergrund steht, muß für öffentliche Verkehrsbetriebe ein weiteres Ziel näher untersucht werden, das Ziel der Gemeinwirtschaftlichkeit.²⁾

Öffentliche Betriebe mit dem Ziel der Gemeinwirtschaftlichkeit sind nach Weisser "Einzelwirtschaften, deren Ergebnis ... unmittelbar dem Wohl einer übergeordneten

1) vgl. Witte, E., a.a.O., S. 78 ff.;

2) "Für einzelwirtschaftliche Gebilde, die von der öffentlichen Hand getragen werden, ... gilt die Vermutung, daß sie gemeinwirtschaftlich sind." Definition des Terminologieausschusses der Gesellschaft zur Förderung der öffentlichen Wirtschaft, in: Archiv für öffentliche und freigemeinwirtschaftliche Unternehmungen, Bd. 1 (1954), S. 277, zitiert nach Witte, E., a.a.O., S. 23

Gesamtheit ... gewidmet ist.".¹⁾ Den gleichen Sachverhalt umschreiben Begriffe wie 'Gemeinnützigkeit', 'Wohl der Gesamtheit', 'Gemeinwohl', 'als öffentlich geltende Interessen'²⁾. Diese Zielvorschriften enthalten noch recht unbestimmte Formulierungen. Die Geschäftsleitung öffentlicher Verkehrsbetriebe kann nicht festlegen, was gemeinwirtschaftlich richtig ist, da es sich hier um Probleme handelt, die nur aus der Sicht der gesamten Wirtschaft zu beurteilen sind und politische Entscheidungen erfordern. Die Gemeinwirtschaftlichkeit muß deshalb in konkrete Aufgabenstellungen umgesetzt werden. "Aus dieser Sicht sind die oben zitierten Generalklauseln allgemeines Wohl, gemeinwirtschaftliche Aufgabe, etc. überhaupt keine befolgbaren Anforderungen an die Unternehmungen, sondern Postulate gegenüber den kompetenten politischen Instanzen, die Aufgaben der Unternehmung konkret zu definieren."³⁾

Im Grunde ist es wohl die Aufgabe der staatlichen und kommunalen Stellen, ihren Einfluß für die schwächeren der Interessengruppen geltend zu machen. Das Gemeinwohl muß also letztlich als ein Kompromiß zwischen den Gruppeninteressen verstanden werden. Auch bei öffentlichen Verkehrsbetrieben werden insofern die

-
- 1) vgl. Weisser, G., Die Lehre von den gemeinwirtschaftlichen Unternehmen, in: Archiv für öffentliche und freigemeinwirtschaftliche Unternehmen, Bd. I (1954) S. 9, zitiert nach Witte, E., a.a.O., S. 25;
 - 2) Weisser, G., Die freigemeinwirtschaftlichen Unternehmen in der Bundesrepublik Deutschland, in: Die öffentliche Wirtschaft, Jg. 14 (1965) S. 60 (Fußnote) zitiert nach Witte E., a.a.O., S. 25;
 - 3) vgl. auch Weisser, G., Die freigemeinwirtschaftlichen Unternehmen in der Bundesrepublik Deutschland, a.a.O., S. 60 (Fußnote)

Oberziele wieder von den Interessen der Gruppen bestimmt. Allerdings verschiebt sich der Einfluß zugunsten von Gruppen, die bei privaten Betrieben wenig Einfluß haben, so vor allem zugunsten der Nachfrager. Die öffentliche Hand kann beispielsweise zugunsten der Nachfrager oder Nachfragergruppen niedrige Preise festlegen.

Von den gemeinwirtschaftlichen Zielen öffentlicher Verkehrsbetriebe kann man sich anhand von Gesetzen eine Vorstellung verschaffen. Diese Gesetze enthalten zwar häufig auch nur allgemeine, wenig konkrete Vorschriften, lassen aber doch erkennen, welche Instrumente den öffentlichen Stellen zur Verfügung stehen, um ihre und die von ihnen vertretenen Interessen geltend machen können.

Neben der allgemeinen Formulierung einer "gemeinwirtschaftlichen Aufgabe"¹⁾ einer Pflicht, zur Wahrung der Interessen der deutschen Volkswirtschaft²⁾ und zur "Erfüllung öffentlicher Bedürfnisse"³⁾ und zu "bester Verkehrsbedienung"⁴⁾ finden sich in den Eisenbahngesetzen weitere, konkretere Hinweise. Die Deutsche Bundesbahn bezeichnet⁵⁾ z.B. als wesentlichste gemeinwirtschaftliche Verpflichtungen die Betriebspflicht (§ 14 Abs. 4 BundesbahnG), die Beförderungspflicht (§ 3 EVO⁶⁾, § 453 HGB) und die

1) § 28, Abs. 1 BundesbahnG

2) § 4 BundesbahnG

3) § 103 Gemeindeordnung Hessen, zitiert nach Suréen, Die Gemeindeordnungen in der Bundesrepublik, Band II, Gemeindevirtschaftsrecht, Köln, Berlin, München, Bonn 1960, S. 240

4) § 28 Abs. 1 BundesbahnG

5) vgl. IV/1449, a.a.O., S. 12

6) Eisenbahnverkehrsordnung (EVO) vom 8. Sept. 1938

Tarifpflicht (§ 6 EVO, § 6 Allgemeines Eisenbahngesetz¹⁾). Artikel 50 des Schweizerischen Eisenbahngesetzes²⁾ erwähnt außerdem noch die Fahrplanpflicht: "Gemeinwirtschaftliche Leistungen ergeben sich aus den Grundpflichten, welche den Eisenbahnen den Charakter öffentlicher Verkehrsdienste verleihen (Betriebspflicht, Fahrplanpflicht, Beförderungspflicht, Tarifpflicht)..."

Die Betriebspflicht besagt, daß die dem Verkehrsbetrieb erteilten Konzessionen nicht einseitig widerrufen werden dürfen. Für die Stilllegung einer Strecke, eines Bahnhofes oder sonstiger großer Dienststellen bedarf es z.B. für die Bundesbahn der Genehmigung durch den Bundesverkehrsminister.³⁾

Die Beförderungspflicht schreibt vor, daß der Verkehrsbetrieb grundsätzlich mit jedem Nachfrager Kontrakte abzuschließen hat.

Die Tarifpflicht bedeutet formell, daß die Tarife die für die Beförderung maßgebenden Bestimmungen und Entgelte enthalten sollen, daß sie zu veröffentlichen und gegenüber allen Nachfragern gleich anzusetzen sind. Die Tarife bedürfen der Genehmigung der zuständigen politischen Instanzen.⁴⁾ Materiell haben die Tarife den Bedürfnissen des allgemeinen Wohls, "insbesondere der wirtschaftlich schwachen und verkehrsungünstig gelegenen Gebiete"⁵⁾ zu dienen.

1) Allgemeines Eisenbahngesetz vom 29.3.1951 i.d.F. des Gesetzes vom 1. Aug. 1961

2) Vom 20.12.1957

3) vgl. § 14 Abs. 4 d BundesbahnG

4) vgl. z.B. § 16 BundesbahnG

5) § 6, Abs. 1 Allgemeines EisenbahnG

Unter der Fahrplanpflicht ist die Pflicht zu verstehen, Fahrpläne staatlichen oder kommunalen Stellen zur Genehmigung vorzulegen und die genehmigten Pläne zu veröffentlichen. Die genehmigenden Stellen können Änderungen vorschlagen, die möglichst zu berücksichtigen sind.¹⁾

Diese gesetzlichen Vorschriften gelten zum Teil auch für private Verkehrsbetriebe.²⁾ Allerdings werden vorwiegend öffentlichen Verkehrsbetrieben tatsächlich bestimmte Auflagen gemacht.³⁾ Nur diese Auflagen stellen letztlich die besonderen Belastungen dar, denen die öffentlichen Verkehrsbetriebe aufgrund des Gemeinwirtschaftlichkeitsziels ausgesetzt sind und die sie im Konkurrenzkampf mit privaten Verkehrsbetrieben benachteiligen können. Dabei wird häufig erst das Zusammenwirken aller 4 gemeinwirtschaftlichen Pflichten schwerwiegende Auflagen begründen können.⁴⁾

1) vgl. z.B. § 17 BundesbahnG

2) vgl. die Vorschriften zur Tarifpflicht in den §§ 20, 20a, 21, 21a, 21b, 22 des GüKG und in § 39 PBefG; die Vorschriften zur Betriebspflicht in den §§ 21, 24 PBefG;

vgl. die Vorschriften zur Beförderungspflicht in § 22 PBefG u. die Vorschriften zur Fahrplanpflicht in § 40 PBefG. Außerdem können die Eisenbahnverkehrsordnung (EVO) und das allgemeine Eisenbahngesetz auch auf Eisenbahnen im Privatbesitz angewendet werden (vgl. § 2 Allgemeines Eisenbahngesetz).

3) vgl. Binder, P., Die gemeinwirtschaftlichen und betriebsfremden Belastungen der Betriebe des öffentlichen Personennahverkehrs, Berlin 1964, S. 56

4) vgl. auch: Bericht über die Deutsche Bundesbahn (DB) vom 30. Januar 1960, in: Drucksache III/ 1602 des Deutschen Bundestages, im folgenden zitiert als III/1602, S. 65 ff.

III. Ableitung eines repräsentativen Fahrplanungsziels privater und öffentlicher Verkehrsbetriebe

- 1) Darstellung und Kritik der in der Fachliteratur genannten Fahrplanungsziele
 - a) Vorbemerkung

Eine Fachliteratur, die sich mit der Aufstellung von Fahrplänen befaßt, gibt es für zwei Verkehrszweige, die sich vorwiegend im Besitz der öffentlichen Hand befinden, für die Deutsche Bundesbahn und für Personennahverkehrsbetriebe. In beiden Fällen wird nur der vor Auftragsannahme aufgestellte Fahrplan betrachtet.

In dieser Literatur werden vor allem die folgenden mit der Fahrplanaufstellung verfolgten Ziele genannt:¹⁾

- 1) Pünktlichkeit
- 2) Sicherheit
- 3) Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse
- 4) Wirtschaftlichkeit
- 5) Hohe Ausnutzung der technischen Leistungsfähigkeit der Anlagen und Fahrzeuge

Happel nennt nur die ersten vier Ziele und sieht die hohe Ausnutzung der Anlagen und Fahrzeuge nicht als besonderes Fahrplanziel²⁾, Meier-Ohlert führt nur das dritte und vierte Ziel sinngemäß an.³⁾

-
- 1) vgl. Chausette, G., a.a.O., S. 141;
Fähnrich, H., a.a.O., S. 12;
Hahn, H., Eisenbahnbetriebslehre, Berlin 1967, S. 65;
Langheinrich, H., Weickelt, H., Die Fahrzeitermittlung als Grundlage der Fahrplangestaltung im Eisenbahnwesen, in: Der operative Dienst 1958, S. 230;
Gutersohn, A., a.a.O., S. 118
 - 2) vgl. Happel, O., a.a.O., S. 79
 - 3) Meier-Ohlert, D.G., a.a.O., S. 249

b) Pünktlichkeit

Pünktlichkeit kann durch einen Vergleich der Sollzeiten des Fahrplans mit den Istzeiten der Durchführung gemessen werden. Sie hängt von der Genauigkeit der Berechnung der technischen Abläufe und der Erfassbarkeit unberechenbarer Störgrößen ab. Zur Verbesserung der Pünktlichkeit fallen während des Planungsprozesses erhöhte Aufwendungen für die Berechnung der technischen Abläufe und für die Beschaffung von Informationen über Störgrößen an. Fahrzeitzuschläge, die ausreichende Reserven für die Einholung von Verspätungen durch erhöhte Geschwindigkeit schaffen sollen, vermindern evtl. die Erträge und erhöhen die Aufwendungen. Erhöhte Pünktlichkeit verbessert andererseits die Erträge. Das Ziel der Pünktlichkeit steht also mit dem Gewinnziel in wechselseitigen, teils konkurrierenden, teils komplementären Beziehungen.

Die Pünktlichkeit ist offenbar vorwiegend eine Frage der Planung des Planungsprozesses. Die dabei auftretenden Probleme sollen in dieser Arbeit jedoch ausklammert werden. Das Problem der Pünktlichkeit entsteht außerdem nur, wenn der Ablauf zukünftiger Vorgänge unsicher ist, weil nur dann Abweichungen vom Soll denkbar sind. Da jedoch auch vom Unsicherheitsproblem abgesehen werden soll, stellt sich die Frage der Pünktlichkeit im Rahmen dieser Arbeit nicht.

c) Sicherheit

Sicherheit kann als generelle Nebenbedingung in dem Sinne aufgefaßt werden, daß in Zweifelfällen immer zu Gunsten der Sicherheit zu entscheiden ist. Um

solche Zweifelsfälle möglichst selten aufkommen zu lassen, sind Sicherheitsbedingungen meist detailliert vorgeschrieben. Sie finden ihren Niederschlag in Vorschriften über Höchstgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Fahrzeugen und Streckenabschnitten, Mindestabständen aufeinander folgender, nebeneinander oder übereinander sich bewogender Fahrzeuge, Vorschriften über die Höchstdauer täglicher Arbeitszeiten und Pausenvorschriften für das Personal, also in konkreten, operationalen Nebenbedingungen. Handelt es sich um gesetzliche Vorschriften oder um technisch erforderliche Bedingungen, kann man sie als Nebenbedingungen vom Typ A ansehen. Zusätzliche Sicherheitsvorschriften aufgrund freiwilliger Zielentscheidungen wären demgegenüber Nebenbedingungen vom Typ B.

d) Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse

Weniger eindeutig ist das dritte der Ziele, die Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse, zu interpretieren. Solange ein Verkehrsbetrieb eine Existenzberechtigung hat, ist die Tatsache, daß überhaupt Verkehrsbedürfnisse befriedigt werden, selbstverständlich. Sie kann also nicht gemeint sein. Andererseits ist die Befriedigung aller denkbaren Verkehrsbedürfnisse wegen der begrenzten Produktionsmittel unmöglich. Das dritte Ziel ist also zunächst kein operationales Ziel, es sind noch ergänzende Erläuterungen notwendig.

Am sinnvollsten läßt sich das Ziel der Befriedigung der Verkehrsbedürfnisse als ein Maximierungsziel interpretieren. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Mittel sind demnach möglichst viele Ortsveränderungen von Transportobjekten vorzunehmen. Dies Ziel entspricht

weitgehend dem allgemeinen Ziel der Gemeinwirtschaftlichkeit im Sinne der besten Verkehrsbedienung. Allerdings gelingt die Verfolgung eines solchen, der Mengenmaximierung in Industriebetrieben entsprechenden Zieles nur in Ausnahmefällen.

Die bei einer Mengenmaximierung auftretenden Probleme zeigen sich bereits bei Industriebetrieben, sobald es sich um eine Mehrproduktfirma handelt. Die operationale Formulierung eines Mengenmaximierungsziels setzt voraus, daß Art und Maßeinheit der zu maximierenden Menge festliegen. Sind mehrere Arten möglich, bleibt offen, welche Arten in welcher Menge zu produzieren sind. Hilfsweise könnte man versuchen, die verschiedenen Arten auf eine Maßeinheit, etwa auf Kilogramm zurückzuführen. Die Produkte wären dann in Gewichtseinheiten zu messen, eine eindeutige Mengenmaximierung wäre möglich. Allerdings erscheint es nun fraglich, ob ein solches Ziel noch in einer komplementären Beziehung zu Oberzielen wie der Gemeinwirtschaftlichkeit steht.

Die für die Leistungen von industriellen Mehrproduktbetrieben angestellten Überlegungen gelten verstärkt für Verkehrsbetriebe. Verkehrsbedürfnisse sind nach Objekten, Versand- und Empfangsorten sowie Abfahrts- und Ankunftszeiten verschieden. Das Ziel der Maximierung der Ortsveränderung von Objekten gibt keinen Anhaltspunkt über die Auswahl von Objekten, Orten oder Zeiten, die der Verkehrsbetrieb treffen soll, um die beste Verkehrsbedienung zu erreichen. Eine zusammenfassende Hilfsgröße, wie etwa der Tonnenkilometer, ist vielleicht als statistisches Hilfsmaß für die Abschätzung geleisteter Ortsveränderungen geeig-

net, nicht jedoch für Planungszwecke.¹⁾ mit dem Tonnenkilometer lassen sich die Art der Objekte, die Richtungen der Strecken und die Zeiten nicht erfassen. Konsequente Maximierung von Tonnenkilometern ergäbe sicherlich nicht den größten Nutzen für die Allgemeinheit.

Wohl nur in besonders gelagerten Fällen dürfte es möglich sein, ein operationales gemeinwirtschaftliches Maximierungsziel zu formulieren. Das Gewinnziel würde dann als Zielnebenbedingung dienen können.

e) Wirtschaftlichkeit

Das Streben nach Wirtschaftlichkeit kann zweierlei bedeuten, Streben nach Kostenminimierung oder nach Kostendeckung.

Das Ziel Kostenminimierung reicht bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme nicht aus, die Aktionsparameter eindeutig festzulegen. Kostenminimierung ist nur dann sinnvoll, wenn die Aufgabe, die es mit den geringsten Kosten zu erfüllen gilt, festgelegt ist. Bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme muß aber die Aufgabe, die Ortsveränderung von Transportobjekten, erst durch die Fahrzeugzuordnungen aus der Gesamtnachfrage ausgewählt werden. Für diese Auswahl bietet die Kostenminimierung keinen Maßstab. Die Kostenminimierung ist nur bei der Fahrplanung nach Auftragsannahme sinnvoll.

Das Ziel Kostendeckung ist dann erreicht, wenn den Kosten gleich hohe Erträge gegenüberstehen. Auch bei einer geringfügigen positiven oder negativen Differenz wird man noch von Kostendeckung sprechen können.

1) vgl. auch Luckow, C., Beiträge zur Ökonomik des Transportwesens unter besonderer Berücksichtigung des Vertragssystems des Eisenbahn-, Schiffs- und Kraftverkehrs, Berlin 1957, S. 51 ff.

Befindet sich ein Verkehrsbetrieb in einer "Verlustsituation"¹⁾, führt das Kostendeckungsziel zum gleichen Ergebnis wie das Gewinnmaximierungsziel (=Verlustminimierungsziel). Sobald Gewinne erreicht werden können, muß der Verkehrsbetrieb mit Rücksicht auf das Kostendeckungsziel auf Erträge verzichten. Eine Gleichheit von Kosten und Erträgen, nur um der Gleichheit willen, ist aber sinnlos. Das Kostendeckungsziel muß deswegen durch ein konkurrierendes Ziel ergänzt werden, das statt einer Ertragserhöhung verfolgt werden kann. Ohne ergänzendes Ziel ist ein Kostendeckungsziel sonst nicht operational.

f) Hohe Ausnutzung der technischen Leistungsfähigkeit der Anlagen und Fahrzeuge

Das Ziel hoher Ausnutzung der technischen Anlagen und Fahrzeuge ist bei näherer Betrachtung mehrdeutig. Hohe Auslastung der Wege bedeutet z.B. zwar ebenfalls viele Fahrten, aber nicht zwangsläufig hohe Auslastung des Fassungsvermögens der Fahrzeuge. Die intensive Ausnutzung der Wege durch häufige Fahrzeugfahrten führt zu geringer Ausnutzung des Fassungsvermögens der Fahrzeuge, weil sich nicht genug Objekte ansammeln konnten. Hohe Auslastung des Fassungsvermögens führt dagegen wegen der dafür erforderlichen Wartezeiten in den Stationen zu geringerer Auslastung der Wege und Fahrzeuge.

Hohe Auslastung ist im übrigen kein sinnvolles Ziel. Es bekommt nur dann einen Sinn, wenn dahinter das Streben nach möglichst viel Leistung steht. Dann aber muß zwischen der Auslastung von Wegen, Stationen und

1) Bidlingmeier, J., Unternehmerziele, a.a.O., S. 90 ff.

Fahrzeugen ein Kompromiß gefunden werden, der die höchste Leistung ermöglicht. Ein solcher Kompromiß müßte auch zwischen Auslastung der Anlagen und Fahrzeuge einerseits und Durchschnittsgeschwindigkeit der durchlaufenden Objekte andererseits gefunden werden. Man kann hier Parallelen zum Dilemma der Ablaufplanung bei Werkstattfertigung¹⁾ ziehen. Für die Art des Kompromisses zwischen Auslastung und Durchlaufgeschwindigkeit bleiben viele Alternativen, unter denen erst anhand anderer Ziele eine Auswahl möglich ist, offen.

Da die in der Verkehrsliteratur genannten Ziele zu wenig operational und allgemeingültig sind, soll im folgenden ein Fahrplanungsziel aus den Oberzielen abgeleitet werden.

2) Gewinnmaximierung mit Zielnebenbedingungen als Fahrplanungsziel

a) Erläuterungen zur Gewinnmaximierung

11) Ableitung

Wie bereits erwähnt, läßt sich ein Unterziel am zweckmäßigsten als Maximierungsziel mit Zielnebenbedingungen formulieren. Dieser formale Rahmen ist nun so auszufüllen, daß ein operationales, zu den Oberzielen komplementäres Zielsystem entsteht, das zudem für die meisten Verkehrsbetriebe gültig ist. Soweit es die Forderung nach Allgemeingültigkeit zuläßt, soll das Fahrplanungsziel konkret definiert werden.

1) vgl. Gutenberg, E., a.a.O., S. 213 ff.

Das Gewinnziel nimmt, wie bereits dargelegt, unter den Oberzielen der Verkehrsbetriebe eine besondere Stellung ein, es wird von den meisten privaten und öffentlichen Verkehrsbetrieben bevorzugt angestrebt. Weiterhin ist das Gewinnziel in der Form einer Maximierungsvorschrift durch wenige Angaben zu einem operationalen Ziel zu ergänzen, da das für die Operationalität eines Zieles wichtige Zielausmaß (die Maximierungsvorschrift) bekannt ist. Es bietet sich daher an, das Gewinnziel als Maximierungsziel in das System des Fahrplanungsziels aufzunehmen.

Um das Gewinnziel operational zu formulieren, muß neben dem Ausmaß der Gewinnverfolgung noch die Bezugsperiode, für die der Gewinn zu maximieren ist, angegeben werden.

Als Bezugsperiode soll die Fahrplanungsperiode gewählt werden, der Zeitabschnitt, für den die zeitlich-örtlichen Zuordnungen vorzunehmen sind. Zu maximieren ist also der kurzfristige, in der Fahrplanungsperiode erzielbare Gewinn. Je nach dem im Einzelfall vorliegenden Fahrplanungsproblem kann die Planungsperiode verschieden lang sein. Insbesondere bei kurzen Perioden besteht die Gefahr, daß das meist langfristige Oberziel Gewinnerzielung durch das kurzfristige Unterziel verfehlt wird. Dieser Mangel an Komplementarität soll zugunsten der besseren Operationalität eines kurzfristigen Ziels in Kauf genommen werden. Gegebenenfalls kann die Komplementarität durch entsprechend formulierte Zielnebenbedingungen erreicht werden. Auf diese Frage soll bei der Darstellung der Zielnebenbedingungen noch näher eingegangen werden.

Der Gewinn ist als Differenz zwischen Erträgen und Aufwendungen zu kennzeichnen. Erträge und Aufwendungen sind Einnahmen und Ausgaben, die der Fahrplanungsperiode zugerechnet sind. Da das Gewinnmaximierungsziel zur Auswahl von Aktionsparametern der Fahrplanung dienen soll, sind nur die Erträge und Aufwendungen zu berücksichtigen, die durch die Fahrplanung beeinflussbar sind.

Bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme sind sämtliche bei der Leistungserstellung anfallenden Erträge fahrplanungsabhängig, während einige Aufwendungen von der kurzfristigen Fahrplanung unabhängig sind. Da diese Aufwendungen durch die Gewinnspannen aus fahrplanungsabhängigen Erträgen und Aufwendungen zumindest gedeckt werden sollen, kann man eine solche Gewinnspanne auch als Deckungsbeitrag bezeichnen. Es wird also mit der Fahrplanung eine Deckungsbeitragsmaximierung angestrebt.

Das vollständige Deckungsbeitragsziel ist nur für die Planung vor Auftragsannahme erforderlich. Bei Planung nach Auftragsannahme kann es auf das Ziel der Aufwandsminimierung reduziert werden. In diesen Fällen liegen die gewünschten Ortsveränderungen und damit auch die Erträge bereits vor der Fahrplanung fest, sie sind also von der Fahrplanung nicht beeinflussbar. Da die Erträge festliegen, läßt sich der maximale Deckungsbeitrag durch eine Aufwandsminimierung allein erreichen. Das Deckungsbeitragsziel geht somit bei der Fahrplanung nach Auftragsannahme in das Ziel der Aufwandsminimierung über.

22) Gewinneinflußgrößen

Fahrplanungsabhängige Erträge und Aufwendungen sind eine Funktion der Aktionsparameter der Fahrplanung. Man kann auch kurz von einer Ertrags- und einer Aufwandsfunktion sprechen. Diese Funktionen erfassen die Abhängigkeit der Erträge und Aufwendungen von den zeitlich-örtlichen Zuordnungen der Fahrzeuge, der Transportobjekte und des Fahrpersonals.

Die Erträge setzen sich aus der Menge und dem Preis der Verkehrsleistungen zusammen. Wie bereits nachgewiesen wurde, sind die Preise während der Planungsperiode vorgegeben. Sie können aber zu verschiedenen Zeiten verschieden hoch sein, wie das beispielsweise bei Tag- und Nachtтарifen öffentlicher Nahverkehrsmittel der Fall sein kann. Die Menge der Verkehrsleistungen wird demgegenüber bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme von den zeitlich-örtlichen Fahrzeugzuordnungen mit determiniert. Je nach Art der Fahrzeuge, der angefahrenen Stationen sowie der Abfahrts- und Ankunftszeiten wird ein anderer Ausschnitt aus der zeitlich und örtlich strukturierten Nachfrage getroffen und eine andere Menge von Verkehrsleistungen ausgewählt. Wenn die Preise zeitlich differenziert sind, ist zusätzlich auch die Preiskomponente des Ertrags von zeitlichen Zuordnungen abhängig.

Die Aufwendungen hängen erstens von den zugeordneten Produktionsmitteln, Fahrzeugen, Fahrpersonal und Transportobjekten ab. Durch das Antriebsaggregat eines Fahrzeugs werden Energie und Betriebsstoffe wie z.B. Schmiermittel verbraucht. Multipliziert mit den Preisen dieser Verbrauchsgüter ergibt sich der Verbrauchs-

aufwand. Aggregate, Transportgefäße und die von ihnen benutzten ortsfesten Anlagen unterliegen einer nutzungsabhängigen Abnutzung, die Inspektions-, Reparatur- oder Ersatzausgaben nach sich zieht, die auf die Abnutzungen umzurechnen sind. Falls die ortsfremden Anlagen nicht ständig mit Personal, das im Zeitlohn steht, besetzt sind, können außerdem nutzungsabhängige Personalaufwendungen anfallen. Werden fremde ortsfeste Anlagen genutzt, können benutzungsabhängige Gebühren in die Aufwandsfunktion eingehen.

Fahrpersonalaufwand ist in der Aufwandsfunktion nur zu berücksichtigen, wenn die Einsatzstunden gegenüber den Ruhestunden erhöhte Ausgaben bedingen. Gegebenenfalls sind auch zusätzliche Aufwendungen für auswärtige Unterbringung des Fahrpersonals vor oder nach einer Fahrt zu erfassen.

Die Transportobjekte beeinflussen den Aufwand vor allem über das Gewicht des beladenen Fahrzeugs. Bei Transportverfahren ohne Fahrzeug bestimmt die Beschaffenheit der Transportobjekte die Aufwendungen zum Teil recht erheblich. Bei einer Rohölpipeline stellt z.B. die Viskosität des Rohöls eine wesentliche Kosteneinflußgröße dar.

Zweitens legen örtliche Zuordnungen fest, welche Produktionsmittel kombiniert werden und bestimmen auf diese Weise die Höhe der Aufwendungen mit. So beeinflußt beispielsweise die Art einer Strecke mit ihren Steigungen, Gefällen und Kurven im Zusammenwirken mit dem der Strecke zugeordneten Fahrzeug und dessen technischen Eigenschaften die Höhe der Verbrauchs- und Nutzungsaufwendungen.

Die Höhe der Aufwendungen wird drittens wesentlich von den zeitlichen Zuordnungen beeinflusst. Abfahrts- und Ankunftszeit bestimmen die Höhe der Aufwendungen zunächst über die durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit. Die durchschnittliche Geschwindigkeit ist gleich der Streckenlänge : (Ankunftszeit - Abfahrtszeit). Eine genaue Aufwandsermittlung setzt allerdings entweder eine tatsächlich gleichbleibende Geschwindigkeit oder aber eine weitere Unterteilung der Gesamtstrecke in Teilabschnitte, für die die gefahrenen Geschwindigkeiten bekannt sind, voraus. Im Grenzfall kann eine Strecke in so viele Abschnitte zerlegt werden, daß Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge und die damit verbundene Aufwandshöhe erfaßbar sind.

Je höher die gefahrenen Geschwindigkeiten sind, umso mehr Verbrauchsaufwendungen und nutzungsabhängige Aufwendungen werden für 1 Fahrzeugfahrt anfallen, falls die optimale Geschwindigkeit überschritten wird. Die Fahrpersonalaufwendungen können sich demgegenüber wegen der durch hohe Geschwindigkeiten verkürzten Einsatzzeiten verringern. Da Fahrpersonalaufwendungen auch für Vorbereitungs- und Abschlußarbeiten je Fahrt, für die Heranführung an die Einsatzorte sowie für Ruhezeiten außerhalb der Wohnorte anfallen können, besteht allerdings keine strenge Beziehung zwischen Fahrpersonalaufwand und Fahrtdauer.

Bei der Fahrplanung vor Auftragsannahme bestimmen die Abfahrts- und Ankunftszeiten die Aufwandshöhe auch über das Bruttogewicht der Fahrzeuge. Das Bruttogewicht setzt sich aus Fahrzeuggewicht ("Tara") und Gewicht der geladenen Transportobjekte ("Nettogewicht") zusammen. Die Menge der geladenen Transportobjekte hängt ihrerseits von den Abfahrts- und Ankunftszeiten ab.

Abfahrts- und Ankunftszeiten sind für die Aufwandshöhe schließlich dann von Bedeutung, wenn die Preiskomponente der Aufwendungen zeitabhängig ist. Sind z.B. die Tag- und Nachttarife für elektrische Energie unterschiedlich hoch, beeinflußt die zeitliche Lage einer Fahrzeugfahrt die Höhe der Energieaufwendungen.

Bisher wurde davon ausgegangen, daß sämtliche Aktionsparameter des Entscheidungsfeldes bekannt sind und mit fahrplanungsabhängigen, periodisierten Einnahmen oder Ausgaben, also mit Erträgen und Aufwendungen bewertet werden können. Davon abweichende Bewertungen sind nur dann erforderlich, wenn durch die Bewertung zusätzliche Zusammenhänge vereinfacht erfaßt werden sollen oder wenn die Bewertung auf einfachere Maßgrößen zurückgeführt werden soll.

Zur Erfassung zusätzlicher Zusammenhänge dient beispielsweise das Konzept der Opportunitätskosten. Legt man in einem Entscheidungsfeld Alternativen fest, die in einem anderen Entscheidungsfeld zu Ertragseinbußen führen, kann man die Ertragseinbußen als Kosten (Opportunitätskosten) im 1. Entscheidungsfeld berücksichtigen. Verzichtet man auf die exakte Ermittlung der Ertragseinbußen und schätzt sie lediglich, kann man eine detaillierte Bewertung im anderen Entscheidungsfeld vermeiden und erreicht somit eine vereinfachte Berücksichtigung der Zusammenhänge.

Einfachere Bewertungsmaßgrößen lassen sich erreichen, wenn nicht mehr jede zeitlich-örtliche Zuordnung individuell bewertet wird, sondern nur ihr Beitrag zu einem globaleren Ersatzziel erfaßt wird. Anstelle von Aufwand können dann beispielsweise Einsatzzeiten und gefahrene Kilometer minimiert werden.

Die angedeuteten Vereinfachungsmöglichkeiten ändern nichts an der prinzipiellen Gültigkeit des Gewinnziels, das lediglich zugunsten der Operationalität und zu Lasten der Komplementarität umformuliert wird.

b) Erläuterungen zu den Zielnebenbedingungen

Zielnebenbedingungen sollen die Komplementarität des Unterziels zu Oberzielen ergänzend sicherstellen. Bei der Formulierung solcher Nebenbedingungen ist darauf zu achten, daß sie den Planenden operational vorgegeben werden. Es muß also eindeutig ersichtlich sein, welche Aktionsparameter noch variabel und welche fixiert sind.

Zunächst soll untersucht werden, in welcher Weise bei öffentlichen Verkehrsbetrieben sichergestellt werden kann, daß das Fahrplanungsziel trotz des Gewinnmaximierungsziels auch komplementär zum Ziel der Gemeinwirtschaftlichkeit ist. Das Ziel der Gemeinwirtschaftlichkeit wurde auf die 4 gemeinwirtschaftlichen Pflichten der öffentlichen Verkehrsbetriebe zurückgeführt: Betriebspflicht, Tarifpflicht, Beförderungspflicht, und Fahrplanpflicht.

Betriebspflicht und Tarifpflicht beziehen sich auf Bereiche, deren Planung bereits vor der Fahrplanung abgeschlossen ist. Die Ergebnisse dieser Planungen sind für die Fahrplanung Daten. Werden bei der Festlegung dieser Daten gemeinwirtschaftliche Zielvorstellungen verwirklicht, gehen die gemeinwirtschaftlichen Ziele in die Daten ein und über die Daten wirken sie schließlich auch auf die Fahrplanung. Bereits ohne das Gewinnziel durch Zielnebenbedingungen zu ergänzen, ist

auf diese Weise eine teilweise Komplementarität zum Gemeinwirtschaftlichkeitsziel hergestellt. Beispiele sollen diesen Gedankengang näher erläutern.

Mit Hilfe der Betriebspflicht kann ein Verkehrsbetrieb daran gehindert werden, Desinvestitionen von Wegen und Stationen vorzunehmen. Da die nicht stillgelegten Strecken in die Fahrplanungsüberlegungen einbezogen werden, kann das Ergebnis der Fahrplanung stark durch die regionalpolitisch ausgerichteten Maßnahmen beeinflusst werden.

Mit der materiellen Tarifpflicht kann die öffentliche Hand zahlreiche gemeinwirtschaftliche Überlegungen in die Preispolitik der Verkehrsbetriebe tragen. Die der Fahrplanung vorgegebenen Preise können also beispielsweise struktur- oder sozialpolitische Ziele indirekt in die Fahrplanungen einbeziehen. Die Deckungsbeitragsmaximierung bei festgelegten Preisen bewirkt außerdem tendenziell eine Erweiterung der angebotenen Verkehrsleistungen, solange die Deckungsbeiträge je Verkehrsleistung positiv sind und genügend Produktionsmittel zur Verfügung stehen. Auf diese Weise kann die Forderung nach bester Verkehrsbedienung durch Deckungsbeitragsmaximierung miterfüllt werden. Gemeinwirtschaftlichkeit und Deckungsbeitragsmaximierung sind insofern zumindest partiell komplementär.

Die öffentlichen, zielsetzenden Instanzen können mit Hilfe der Beförderungs- und Fahrplanpflicht direkt in die Fahrplanung eingreifen und ihre gemeinwirtschaftlichen Vorstellungen durchsetzen.

Durch die Beförderungspflicht kann sichergestellt werden, daß bestimmte, beispielsweise besonders niedrig tarifierte Transportobjekte nicht von der Beförderung

ausgeschlossen werden. So sind z.B. die Bundesbahntarife für sperrige Güter verhältnismäßig niedrig¹⁾ angesetzt, durch die Beförderungspflicht wird die Bundesbahn zugleich gezwungen, die sperrigen Güter zu befördern. Personennahverkehrsbetriebe müssen eine Reihe von Personen teils kostenlos, teils zu ermäßigten Tarifen befördern.²⁾ Alle übrigen Entscheidungen, wie die Wahl der zu befahrenden Strecken und die Abfahrtszeiten und Abfahrtshäufigkeiten auf einer Strecke können dagegen in beiden Fällen anhand des Deckungsbeitragsziels festgelegt werden.

Der Planungsspielraum ist stärker eingeschränkt, wenn die Strecken und Stationen in bestimmten, förderungswürdigen Gebieten mit Hilfe der Betriebspflicht aufrecht erhalten werden und Vorzugstarife für diese Relationen festgesetzt sind. Als weitere Bedingung kann mit der Fahrplanpflicht erreicht werden, daß die Strecken und Stationen mit einer Mindestfrequenz befahren werden. In älteren Eisenbahngesetzen finden sich sogar für alle Strecken gültige, generelle Anweisungen über die Mindestfrequenzen. Artikel 5 des Bundesgesetzes betreffend das Tarifwesen der Schweizerischen Bundesbahn vom 27. 6. 1901 schrieb vor: "Die Beförderung von Personen soll täglich mindestens viermal nach beiden Richtungen des Bundesbahnnetzes und mit Anhalten auf allen Stationen erfolgen."³⁾ Pla-

1) vgl. III/1602, a.a.O., S. 65

2) vgl. Binder, P., a.a.O., S. 56 ff. Binder zählt folgende Personengruppen auf: Schwerbeschädigte, Kriegsbeschädigte, Zivilbeschädigte, Zivilbehinderte, Unfallversehrte, Vertriebene, Kinderreiche, Wohlfahrtsunterstützungsempfänger, Polizeibeamte, Zollbeamte.

3) zitiert nach Gutersohn, A., a.a.O., S. 126

nungsfreiheit bleibt hier nur noch für die Festsetzung von Abfahrts- und Ankunftszeiten, wobei entsprechend der Mindestfrequenz eine bestimmte Anzahl solcher Zeiten innerhalb eines Zeitabschnittes festzulegen ist. Dieser globale Eingriff erwies sich jedoch als unzweckmäßig und wurde wieder aufgegeben.

Im Berufsverkehr ist außer den tarifierten Objekten (Berufstätige) und Strecken (Wohnorte-Arbeitsorte) zusätzlich noch ein sehr kleiner Ankunftszeitspielraum (kurz vor Arbeitsbeginn) vorgeschrieben. Auch die Abfahrtszeiten sind nur in sehr engen Grenzen durch Variation der Geschwindigkeit frei zu planen. Bei derart strengen Nebenbedingungen ist der Ertrag durch die Fahrplanung nur noch in engen Grenzen zu beeinflussen, so daß das Gewinnmaximierungsziel durch die Aufwandsminimierung ersetzt werden kann.

In der gleichen Art, in der das Ziel der Gemeinwirtschaftlichkeit neben dem Gewinnmaximierungsziel zur Geltung gebracht werden kann, kann auch die Komplementarität zu anderen Oberzielen durch operationale Nebenbedingungen oder Zielnebenbedingungen erfaßt werden. Beispielsweise kann der langfristige Aspekt des Gewinnziels im Fahrplanungsziel durch Nebenbedingungen bereits erfaßt sein oder durch Zielnebenbedingungen berücksichtigt werden.

Investitionen und Preise werden von einem Verkehrsbetrieb zumeist unter dem Ziel einer langfristigen Gewinnerzielung festgelegt. Beide Planungsbereiche liegen für die Fahrplanung bereits fest und bilden Nebenbedingungen, durch die wiederum der langfristige Aspekt der Gewinnerzielung in die Fahrplanung getragen wird.

Als Zielnebenbedingungen können im Interesse langfristiger Gewinnerzielung beispielsweise Zeiträume festgelegt werden, innerhalb denen mindestens eine Fahrzeugfahrt erfolgen muß. Derartige Mindestfrequenzen sollen sicherstellen, daß die Nachfrage nicht wegen mangelnder Fahrtmöglichkeiten auf lange Sicht zu anderen Verkehrsmitteln abwandert. Es wäre auch möglich, einer Strecke ganz bestimmte Fahrzeugtypen ohne Rücksicht auf das kurzfristige Gewinnmaximierungsziel zuzuordnen, da man sich langfristig eine besonders günstige Wirkung auf die Nachfrager, die Präferenzen für die Fahrzeugausstattung entwickeln sollen, erhofft.

Die noch nicht festgelegten Aktionsparameter werden in beiden Fällen wieder nach dem kurzfristigen Gewinnziel festgelegt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Fahrplanung sowohl privater als auch öffentlicher Verkehrsbetriebe fast immer unter das kurzfristige, auf die Fahrplanungsperiode bezogene Ziel der Maximierung der fahrplanungsabhängigen Deckungsbeiträge mit Zielnebenbedingungen gestellt werden kann. Das Fahrplanungsziel öffentlicher Verkehrsbetriebe unterscheidet sich dabei lediglich durch Zielnebenbedingungen, die stärker als bei privaten Verkehrsbetrieben von gemeinwirtschaftlichen Überlegungen bestimmt sind. Wird nach Auftragsannahme geplant, kann das Gewinnmaximierungsziel durch das Ziel der Aufwandsminimierung ersetzt werden.

E. Die Grenzen der generellen Betrachtungsweise des Fahrplanungsproblems

Im Teil 1 sollte die Struktur des Fahrplanungsproblems herausgearbeitet werden. Zu diesem Zweck mußte zunächst eine einheitliche Terminologie gefunden und

von den Besonderheiten einzelner Verkehrsbetriebe abstrahiert werden. Für eine Generalisierung und Formalisierung des Problems bot sich die Planungs- und Entscheidungstheorie an.

Die Fahrplanung bezieht sich demnach auf ein Entscheidungsfeld, das durch Aktionsparameter und Daten gekennzeichnet ist. Die Auswahl der zulässigen Aktionsparameter erfolgt anhand des für den Bereich der Fahrplanung generell gültigen Unterziels. Die ausgewählte Kombination von Aktionsparametern (ausgewählte Alternative) stellt das Ergebnis der Planung dar und geht in den Fahrplan oder die Fahrpläne ein.

Die Aktionsparameter wurden als Zuordnungen von Transportobjekten, Fahrzeugen und Fahrpersonal zu Zeit und Ort definiert. Daten sind die sachlichen und personellen Produktionsmittel, die natürlichen Eigenschaften der Transportobjekte sowie zusätzliche, die Beförderungswünsche kennzeichnende Zeit- und Ortsangaben je Transportobjekt. Die natürlichen und zusätzlichen Eigenschaften der Transportobjekte kennzeichnen die Nachfrage, die es gemäß dem Fahrplanungsziel zu erfüllen gilt.

Die zugleich mit der Abgrenzung des Entscheidungsfeldes durchgeführte Analyse der Aktionsparameter und Daten zeigte bereits die vielfältigen Zusammenhänge und den Umfang des Fahrplanungsproblems. Dieser Umfang läßt sich durch die Anzahl der Zuordnungsmöglichkeiten für Transportobjekte und bewegliche Produktionsmittel zu Zeit und Ort wiedergeben.

Der Problemumfang ist erstens von der Länge der Planungsperiode und der Größe der Zeitabschnitte, zu denen Zuordnungen erfolgen können, abhängig. Wird die Ausdehnung der Zeitabschnitte unendlich klein und liegen die dadurch entstehenden Zeitpunkte unmittelbar

nebeneinander, geht man also von der diskreten zur kontinuierlichen Betrachtung der Zeit über, so wird die Zahl der Zuordnungsmöglichkeiten zur Zeit bereits unendlich groß.

Zweitens bestimmt die Größe und Art des Netzes aus Stationen, Depots und Wegen und die festgelegte Ausdehnung der Zuordnungsorte die Zahl der Möglichkeiten. Auch hier wird die Zahl der möglichen Zuordnungen unendlich groß, wenn man von der diskreten zur kontinuierlichen Betrachtungsweise übergeht.

Die Zahl und Art der Transportobjekte, der Fahrzeuge und des Fahrpersonals stellt die dritte Bestimmungsgröße für den Umfang des Problems dar.

Sähe man nun von allen naturgesetzlich, rechtlich und wirtschaftlich bedingten Beziehungen unter den Bestimmungsgrößen ab, so könnte jedes Transportobjekt oder bewegliche Produktionsmittel jedem Zeitabschnitt und jedem Ort alternativ in alternativen Zuordnungsreihenfolgen zugeordnet werden. Die Zahl der theoretisch möglichen Zuordnungskombinationen ergäbe sich dann nach den Gesetzen der Kombinatorik durch Multiplizieren und Potenzieren der Einzelzuordnungen untereinander.

Um die Zahl der tatsächlich möglichen Kombinationen oder Fahrplanungsalternativen zu ermitteln, müssen die Beziehungen zwischen den Aktionsparametern untereinander und zu den Daten bekannt sein. Die Ermittlung der theoretisch zwar möglichen, zum großen Teil aber praktisch unmöglichen Kombinationen führt nicht weiter, und die Ermittlung der tatsächlich möglichen Alternativen scheitert an der Vielzahl der denkbaren

Beziehungen und außerdem an der auch bei Berücksichtigung der Beziehungen immer noch großen Zahl von Alternativen.

Die in der Problemanalyse herausgestellten Strukturelemente lassen sich aus diesen Gründen nicht in einer generellen Synthese zusammenfügen, das Zusammenwirken der Elemente läßt sich auf diese Weise nicht zeigen. Um dennoch einen Einblick in Ablaufzusammenhänge zu bekommen und um auf Lösungsmöglichkeiten des dargestellten Problems hinweisen zu können, soll im folgenden eine Synthese mit Hilfe von Modellen versucht werden.

Teil 2

Synthese mit Modellen

A. Überblick über die Synthese mit Modellen

I. Anforderungen an die Modelle:

Isomorphie und Lösbarkeit

Um das generell dargestellte Fahrplanungsproblem in Modellen darstellen zu können, muß es auf weniger umfangreiche, konkretere Probleme reduziert, weiter vereinfacht und formalisiert werden.

An die Modelle sind dabei zwei wichtige Anforderungen zu stellen: Die Modellstruktur soll einmal weitgehend mit der Struktur des analysierten Fahrplanungsproblems übereinstimmen (isomorph sein).¹⁾ Zum anderen sind die Modelle so zu formulieren, daß sie grundsätzlich lösbar sind.

So ist mindestens zu fordern, daß die Zuordnungen der Fahrzeuge zu Zeit und Ort physikalisch tatsächlich möglich sind, daß also die durch Höchstgeschwindigkeiten oder technisch notwendige Zeiten gesetzten Bewegungsgesetze beachtet werden. Unzulässig sind demnach Fahrplanungsmodelle mit Zuordnungen von Fahrzeugen zu Zeit und Ort, die unverknüpfbar sind. Die Lösungen solcher Modelle sind für Fahrplanungsprobleme von vornherein unbrauchbar, da sie nicht zu realisierbaren Fahrplänen führen.

Ein Fahrplanungsmodell muß ferner auf den gewünschten Ortsveränderungen von Transportobjekten aufbauen, weil diese letztlich der Grund für die Zuordnungen der beweglichen Produktionsmittel sind. Klammerte man diesen Zusammenhang aus den Modellen aus, würden lediglich

1) vgl. Kosiol, E., Modellanalyse als Grundlage unternehmerischer Entscheidungen, in: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, 13. Jg. (1961), S. 321

Teilprobleme der Fahrplanung untersucht, die wichtige Beziehung zwischen der zeitlich-örtlichen Struktur der Nachfrage und den Zuordnungen der beweglichen Produktionsmittel bliebe unberücksichtigt.

Alle Aktionsparameter brauchen dagegen nicht in ein Fahrplanungsmodell aufgenommen zu werden. Je nach Lage des Einzelfalls genügt eine Beschränkung auf die wichtigsten Größen. Steht z.B. fest, daß mit den Fahrzeugzuordnungen i.d.R. bestimmte Fahrpersonalzuordnungen verbunden sind, und ist das Fahrpersonal ausreichend verfügbar, können die Einflüsse der Fahrpersonalzuordnungen auf das Fahrplanungsziel mit hinreichender Genauigkeit bereits mit den Fahrzeugzuordnungen erfaßt werden. In allen Modellen mit Fahrzeugzuordnungen müssen außerdem die Transportobjektzuordnungen außerhalb der Modellansätze bleiben, da sonst zu komplizierte Modelle entstünden. Bei den Pipelines wären dagegen die Transportobjektzuordnungen als wichtigste Aktionsparameter anzusehen.

Daten müssen nur insoweit in ein Modell aufgenommen werden, als sie voraussichtlich schwerwiegende Begrenzungen, die zu Engpässen führen, bedingen. Bezieht sich das Fahrplanungsmodell auf Situationen, in denen einfache Unterziele zum Fahrplanungsziel komplementär sind, können die einfachen Ziele vorgegeben werden. So können beispielsweise in vielen Fällen die Zielnebenbedingungen des Gewinnmaximierungsziels unberücksichtigt bleiben oder Ersatzziele herangezogen werden.

Die Reduzierung des Fahrplanungsproblems beispielsweise auf die gewinnmaximale Planung von Fahrzeugzuordnungen zu relativ großen Zeit- und Streckenabschnitten unter Berücksichtigung der Nachfragestruktur kann also trotz der Vernachlässigung anderer Aktionsparameter

und Daten und trotz eines vereinfachten Fahrplanungsziels zu einem ausreichend isomorphen Modell führen.

Um die Modelle lösen zu können, könnte man sie so einfach gestalten, daß alle innerhalb des Modells zulässigen Alternativen aufzuzählen und zu bewerten sind, so daß eine Alternative ausgewählt werden kann (Verfahren der Enumeration). Da sich derart einfache Modelle jedoch kaum isomorph gestalten lassen, muß nach komplizierteren Modellen, die aber wegen ihrer Komplexität ohne Enumeration lösbar sein müssen, gesucht werden.

In der Unternehmensforschung (Operations Research) sind Verfahren entwickelt worden, die es erlauben, komplexe Modelle ohne Enumeration zu lösen. Jedes der Verfahren ist jedoch nur auf eine besondere Problemstruktur anwendbar. Die Struktur von Fahrplanungsmodellen muß deshalb mit einer der Problemstrukturen der Unternehmensforschung in Einklang gebracht werden.

Diese Modellgestaltung mit Rücksichtnahme auf die Lösbarkeit der Modelle führt jedoch in den meisten Fällen zu einem Widerspruch mit dem Wunsch nach isomorphen Modellen. Gegebenenfalls muß daher ein sinnvoller Kompromiß zwischen den konkurrierenden Anforderungen Isomorphie und Lösbarkeit gesucht werden. In vielen Fällen kann das durch einen Verzicht auf optimale Lösungen geschehen, indem Probier- und Näherungsverfahren zur Lösung herangezogen werden.

II. Der Aufbau der Modelldarstellung

Die Modelle werden in 2 Hauptabschnitten dargestellt. Der 1. Hauptabschnitt (B) befaßt sich vorwiegend mit Modellen in denen die örtliche Zuordnung betont wird, während im 2. Hauptabschnitt (C) die zeitliche Zuordnung im Vordergrund der Untersuchung steht. Während die Modelle im Hauptabschnitt B zum größten Teil der Literatur zur Unternehmensforschung entnommen werden können, und nur einer kritischen Beurteilung unterzogen werden müssen, muß das Modell für die Erfassung auch zeitlicher Zuordnungen im Hauptabschnitt C noch entwickelt werden.

Die isolierte Untersuchung der örtlichen Zuordnungen ist nur unter bestimmten Annahmen über die Nachfragestruktur ohne Verletzung der Isomorphie der Modelle möglich: Die einmal entstandene Nachfrage muß während der gesamten Fahrplanungsperiode bestehen bleiben, solange sie nicht durch Fahrzeugfahrten des planenden Verkehrsbetriebes befriedigt wird. Die Höhe der Gesamtnachfrage kann dabei bereits am Anfang der Periode festliegen oder sich durch hinzukommende Nachfrage kumulieren.

Liegt die Höhe der Gesamtnachfrage am Anfang der Periode fest und bleibt unveränderlich, ist der genaue Zeitpunkt von Fahrten gleichgültig, da in jedem Zeitpunkt ein Teil dieser Nachfrage durch Fahrten befriedigt werden kann.

Die zeitlichen Zuordnungen entfallen natürlich nicht. Sie ergeben sich entweder zwangsläufig mit den örtlichen Zuordnungen oder werden nach technisch-organisatorischen Gesichtspunkten gesondert festgelegt. In beiden Fällen bleiben sie ohne Einfluß auf die Ertragsfunktion.

Bei Beschränkung auf die Planung der örtlichen Zuordnungen muß ferner von einer Aufwandsfunktion, die von zeitlichen Zuordnungen unabhängig ist, ausgegangen werden.

Bei einer sich kumulierenden Nachfrage kann die zeitliche Zuordnung bereits eine große Rolle spielen. Es muß zwischen sofortigem und verzögertem Fahrtantritt (in der englischsprachigen Literatur als timing bezeichnet) gewählt werden. Bei verzögertem Fahrtantritt kann sich mehr Nachfrage für eine Fahrt kumulieren, so daß die Auslastung und damit vor allem der Ertrag je Fahrt erhöht wird. Den Vorteilen des verzögerten Fahrtantritts stehen eventuell Nachteile durch das Warten der Fahrzeuge gegenüber. Ohne solche Nachteile des Wartens ist die Entscheidungsregel einfach: Es ist immer bis zur Vollauslastung zu warten.

Durch das Warten können jedoch erhöhte Aufwendungen oder zukünftige Ertragsausfälle bedingt werden, so daß die Länge der Wartezeit nicht anhand einer generellen Entscheidungsregel festgelegt werden kann. Modelle, die solche zeitlichen Zusammenhänge berücksichtigen, gehören somit eigentlich in den Hauptabschnitt C. Da aber die zur Lösung herangezogenen Simulationsmodelle derartige Zusammenhänge nur indirekt erfassen können, werden sie im Hauptabschnitt B dargestellt.

Die Annahme, daß die einmal entstandene Nachfrage während der Fahrplanungsperiode bestehen bleibt, ist vor allem bei der Fahrplanung nach Auftragserteilung realistisch. Geht man allerdings von relativ langen Nachfrageperioden aus und läßt Aufträge längere Zeit unefürdert liegen, kann es zu Nachfrageausfällen kommen. In diesen Fällen müssen für die Aufträge ergänzende Zeitgrenzen angegeben werden, innerhalb denen Aufträge

abzuwickeln sind. Solche Zeitgrenzen erzwingen gegebenenfalls bestimmte zeitliche Fahrzeugzuordnungen, die eine Abweichung vom günstigeren Optimum ohne Zeitgrenzen erfordern können. Der Wert der Deckungsbeitragsfunktion wird also indirekt durch die erzwungenen zeitlichen Fahrzeugzuordnungen beeinflusst. Modelle mit derartigen Zeitgrenzen werden ebenfalls noch im Hauptabschnitt B mitbehandelt. Dies ist insofern sinnvoll, als diese Art des Zeiteinflusses in Modellen, die für die Erfassung nur örtlicher Zuordnungen entwickelt wurden, ergänzend berücksichtigt werden kann.

Im 2. Hauptabschnitt (C) wird versucht, den direkten Einfluß zeitlicher Zuordnungen auf die Zielfunktion zu erfassen. Das ist vor allem dann notwendig, wenn die Nachfrage in einzelnen Zeitabschnitten unterschiedlich hoch ist und jeweils nur in den einzelnen Zeitabschnitten bestehen bleibt. Erfolgt in einem Zeitabschnitt keine Fahrt, geht die Nachfrage und somit der erzielbare Ertrag dieses Zeitabschnitts verloren. Der mit einer Fahrt erzielbare Ertrag wird also von dem gewählten Zeitabschnitt beeinflusst. Die nur für Zeitabschnitte beständige Nachfrage ist typisch für die Fahrplanung vor Auftragsannahme.

Die zur Lösung der Fahrplanungsmodelle herangezogenen Verfahren der Unternehmensforschung erfassen die Struktur von Zuordnungsproblemen und von kombinatorischen Problemen. Beide Aspekte, der Aspekt der Zuordnung und der kombinatorische Aspekt, gehören zum Fahrplanungsproblem. Je nachdem, welcher Aspekt betont wird, ergibt sich eine andere Modellstruktur und ein entsprechendes Lösungsverfahren. Gemäß den unterschiedlichen Problemstrukturen ist auch der Hauptabschnitt B eingeteilt. In einem dritten Abschnitt des Hauptabschnitts

B wird ergänzend die Simulation als 3. Lösungsmethode anhand eines Beispiels dargestellt.

Die zunächst naheliegende Lösung des Fahrplanungsproblems mit Hilfe der Netzplantechnik erweist sich als nicht sinnvoll, da Netzpläne nur zeitliche Interdependenzen, nicht aber zugleich örtliche Interdependenzen von Ereignissen erfassen können. Für die eindeutige Abbildung von Fahrplanalternativen müßten jedoch beide Arten von Alternativen zugleich zu erfassen sein.

Das im Hauptabschnitt C entwickelte Modell wird vor allem mit Hilfe der dynamischen Programmierung dargestellt und gelöst. Die dynamische Programmierung ist ihrerseits eine Methode zur Lösung kombinatorischer Probleme.

B. Fahrplanungsmodelle in der Literatur zur Unternehmensforschung - Betonung der örtlichen Zuordnung

I. Die Interpretation des Fahrplanungsproblems als Zuordnungsproblem

1) Kennzeichnung der Struktur von Zuordnungsproblemen

a) Begriff

In der Literatur zur Unternehmensforschung erfaßt die Bezeichnung "Zuordnungsproblem" Begriffe mit verschiedenem großem Umfang.

Kern weist darauf hin, daß von einigen Autoren nur ein ganz spezielles Problem als Zuordnungsproblem bezeichnet wird.¹⁾ Dieses in der übrigen Literatur auch

1) vgl. Kern, W., Operations Research, Stuttgart 1964, S. 32;
vgl. auch Churchman, Ackoff, Arnoff, Operations Research, 2. Aufl., Wien, München 1964, S. 255

als Ernennungsproblem oder Zuordnungsproblem i.e.S. bezeichnete Problem¹⁾ läßt sich kurz so kennzeichnen: Eine Anzahl von Mitteln verschiedener Art ist einer gleich großen Anzahl verschiedener Aufgaben so zuzuordnen, daß für jede Aufgabe ein Mittel vorgesehen wird. Gesucht wird der größte, durch die Zuordnungen erreichbare Erfolg.

Eine Reihe von Autoren meint mit Zuordnungsproblemen auch die Probleme, in denen mehrere Einheiten einer Mittelart einer der Aufgaben zugeordnet werden können (=Transportprobleme) oder in denen mehrere Mittelarten in begrenzten Mengen mehreren Aufgaben zugeordnet werden können (=allgemeine lineare Zuordnungsprobleme)²⁾. Diesen Problemen ist gemeinsam, daß sie mit den Verfahren der linearen Programmierung gelöst werden können. In diesem zweiten Sinne soll die Bezeichnung "Zuordnungsproblem" im folgenden gebraucht werden.

Zu erwähnen ist noch, daß von einigen Autoren auch Probleme wie die sogenannte Bemühungsaufteilung³⁾, die mehrstufige Zuteilung⁴⁾ und das travelling salesman-Problem⁵⁾ zu den Zuordnungsproblemen gerechnet

-
- 1) vgl. Kern, W., Operations Research, a.a.O., S. 32
vgl. auch Sasieni, Yaspan, Friedman, Methoden und Probleme der Unternehmensforschung, Würzburg, Wien 1965, S. 193 ff.;
 - 2) vgl. Kern, W., Operations Research, a.a.O., S. 32
Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 193 ff.;
 - 3) Vazsonyi, A., Die Planungsrechnung in Wirtschaft und Industrie, Wien und München 1962, S. 189 ff.;
 - 4) Brusberg, H., Der Entwicklungsstand der Unternehmensforschung mit besonderer Berücksichtigung der Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden 1965, S. 204 ff.;
 - 5) vgl. Vokuhl, P., Die Anwendung der linearen Programmierung in Industriebetrieben, Berlin 1965, S. 142., S. 85 ff.

werden. Diese Probleme lassen sich nicht mit den üblichen Verfahren der linearen Programmierung lösen, da es sich um kombinatorische Probleme handelt. Auf diese Probleme soll noch eingegangen werden.

b) Allgemeine Kennzeichnung

Bei allen Zuordnungsproblemen wird unterstellt, daß sich ein Gesamtsystem in Aufgaben oder Prozesse zerlegen läßt.¹⁾ Den Prozessen werden je eine Mittelart (Ernennungsprobleme), mehrere Einheiten einer Mittelart (Transportprobleme) oder begrenzte Mengen mehrerer Mittelarten (allgemeine lineare Zuordnungsprobleme) zugeordnet. Die in die Prozesse hineinfließenden Mittel bezeichnet man als input, die nach der Verarbeitung innerhalb des Prozesses wieder herausfließenden als output. Input und output werden als Flußgrößen bezeichnet.

Die Mengen der Flußgrößen sind von der Intensität bzw. dem Niveau der Prozesse abhängig. Die Art der Abhängigkeit einer Flußgröße von einem Prozeßniveau wird durch einen input-output-Koeffizienten wiedergegeben. Die Flußgrößen müssen immer proportional zum Prozeßniveau sein, was bei konstanten Koeffizienten der Fall ist. (Annahme der Proportionalität)²⁾ Ein verdoppeltes Prozeßniveau bedeutet also z.B. auch verdoppelte input- und output-Mengen.

1) vgl. zu der folgenden Darstellung: Dantzig, G. B., Lineare Programmierung und Erweiterungen, Berlin, Heidelberg, New York 1966, S. 38 ff.

2) vgl. Dantzig, G.B., a.a.O., S. 38 f.

Die Flußgrößenmengen, die innerhalb des Systems in Prozesse hinein- und aus ihnen herausfließen, müssen mit den dem System insgesamt vorgegebenen entsprechenden Flußgrößenmengen übereinstimmen. Um diese Übereinstimmung herstellen und kontrollieren zu können, müssen die Flußgrößen jeder Art addierbar sein (Annahme der Additivität).¹⁾ Durch Konvention ist festgelegt, daß der input addiert, der output subtrahiert wird. Entsprechend sind die input-output-Koeffizienten des input positiv, die des output negativ.

Eine der Flußgrößen ist als Zielgröße definiert. Sie bestimmt den Wert des Systems und ist durch die Wahl von Prozeßniveaus zu minimieren oder zu maximieren.

Zu minimierende Aufwendungen sind also eine besondere input-Art, zu maximierende Erträge eine besondere output-Art. Auch die Zielgröße muß proportional zu den Prozeßniveaus sein. Statt von Proportionalität spricht man hier von einer linearen Abhängigkeit (Annahme der Linearität der Zielfunktion)²⁾.

Da es in der Realität keine negativen Tätigkeiten oder Prozesse geben kann, ist bei der mathematischen Formulierung eines Zuordnungsproblems gesondert darauf zu achten, daß keine negativen Prozeßniveaus zugelassen werden (Annahme der Nichtnegativität).³⁾

1) vgl. Dantzig, G. B., a.a.O., S. 39 f.;

2) vgl. Dantzig, G.B., a.a.O., S. 40

3) vgl. Dantzig, G.B., a.a.O., S. 107.

Das allgemeine lineare Zuordnungsproblem läßt sich mathematisch durch ein System aus einer linearen Zielfunktion und linearen Ungleichungen formulieren.¹⁾ Die Zahl der Variablen der Zielfunktion entspricht der Zahl der Prozesse, die Zahl der Gleichungen oder Ungleichungen entspricht der Zahl der beschränkten Flußgrößenarten. Zusätzlich sind die Ungleichungen zur Sicherstellung nicht-negativer Prozeßniveaus aufzustellen. Dieses System läßt sich durch die Anwendung bestimmter Lösungsverfahren lösen, ohne daß sämtliche alternativen Kombinationen von Prozeßniveaus aufgezählt, bewertet und verglichen werden müssen.

Da die input-output-Koeffizienten in allgemeinen linearen Zuordnungsproblemen als ganze Zahlen, echte oder gemischte Brüche auftreten können, werden bei der Auflösung des Systems, bedingt durch die dafür erforderlichen Additionen oder Divisionen, meist nicht-ganzzahlige Lösungen entstehen.

c) Kennzeichnung der Sonderfälle

Das Transportproblem und das Ernennungsproblem sind Sonderfälle des allgemeinen linearen Zuordnungsproblems.²⁾ Für sie stehen besonders einfache Lösungsverfahren zur Verfügung, sie lassen sich aber auch mit dem Verfahren für das allgemeine lineare Zuordnungsproblem lösen.

-
- 1) vgl. zur Problemstellung und den Lösungsverfahren z.B.: Dantzig, G. B., a.a.O., S. 68 ff, 110ff, S. 243 ff, S. 276 ff;
Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 294, S. 231 ff;
Churchman, Ackoff, Arnoff, a.a.O., S. 253 ff;
- 2) vgl. Dantzig, G. B., a.a.O., S. 368
Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 194;
Kern, W., Optimierungsverfahren in der Ablauforganisation, Essen 1967, im folgenden zitiert als "Ablauforganisation", S. 75

Das Transportproblem läßt sich anschaulich folgendermaßen beschreiben¹⁾: An mehreren Ausgangsorten liegen verschiedene Mengen einer Mittelart bereit, die zu mehreren Bestimmungsorten zu befördern sind. Die Transportkosten für eine Mengeneinheit je Relation Ausgangsort-Bestimmungsort weichen voneinander ab. Gesucht wird die geringste Summe aller Transportkosten. Die gewünschten Mengen je Bestimmungsort müssen in ihrer Summe gleich der Summe der Mengen in den Ausgangsorten sein.

Die Transportmöglichkeiten auf den Relationen sind als Prozesse, die Mengen je Ausgangsort als Mengen einer input-Art, die Mengen je Bestimmungsort als Mengen einer output-Art zu interpretieren. Die wichtigste Besonderheit des Transportproblems ist die Forderung, daß die Summe der input-Mengen gleich der Summe aller output-Mengen sein soll. Um diese Forderung sicherstellen zu können, dürfen die input-output-Koeffizienten, mit denen die Prozeßniveaus zu multiplizieren sind, nur +1 oder -1 betragen, +1 für den input und -1 für den output. Wegen dieser Eigenschaften des Transportproblems sind nur Addition und Subtraktion beim Lösungsverfahren erforderlich, wodurch ein gegenüber dem allgemeinen Problem wesentlich einfacheres Lösungsverfahren und die Ganzzahligkeit der Lösung erreicht werden.²⁾

-
- 1) vgl. zur Problemstellung und zu den Lösungsverfahren z.B. Dantzig, G. B., a.a.O., S. 343 ff.; Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 205 ff.; Churchman, Ackoff, Arnoff, a.a.O., S. 260 ff.
 - 2) vgl. Manne, A.S., Economic Analysis for Business Decisions, New York, Toronto, London 1961, S. 71; Dantzig, G. B., a.a.O., S. 468.

Beim Ernennungsproblem¹⁾ kann nur jeweils eine Zuordnung einer Einheit, die aus mehreren input-Arten auszuwählen ist, zu einem der Prozesse erfolgen. Die Prozeßniveaus können also nur 0 oder 1 betragen, sind also in jedem Fall ganzzahlig. Prinzipiell muß die Zahl der input-Arten gleich der Zahl der Prozesse sein. Diese Gleichheit kann jedoch gegebenenfalls durch fiktive input-Arten oder Prozesse erreicht werden. Der Erfolg jeder Zuordnung kann als der output der Prozesse angesehen werden. Gesucht wird die Kombination aller Zuordnungen, für die die Summe der Erfolge am größten ist. Auf diese Problemstruktur lassen sich Verfahren anwenden, die die Bewertung aller $n!$ ²⁾ Zuordnungsalternativen vermeiden.³⁾

2) Verkehrsbetriebliche Zuordnungsmodelle mit mangelnder Isomorphie zum Fahrplanungsproblem

a) Vorbemerkung

In der Literatur zur Unternehmensforschung finden sich zahlreiche Beispiele für die direkte Anwendung der für Zuordnungsprobleme entwickelten Verfahren auf Probleme von Verkehrsbetrieben. Wegen der direkten Anwendung müssen die Modelle mit Rücksicht auf die Verfahren aufgestellt werden. Die Modelle sind dann zwar lösbar, die Isomorphie solcher Modelle mit dem Fahrplanungsproblem muß jedoch zwangsläufig vernachlässigt werden.

-
- 1) vgl. zur Problemstellung und zu den Lösungsverfahren: Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 193 ff.
Kern, W., Operations Research, S. 32 f.
Dantzig, G. B., a.a.O., S. 361 ff.
 - 2) n = Anzahl der input-Arten = Anzahl der Prozesse
Die Anzahl aller möglichen Zuordnungen ist eine Permutation ohne Wiederholung, $P_n = n!$.
 - 3) vgl. Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 95 ff.
Dantzig, G. B., a.a.O., S. 361 ff.

Häufig fehlt die als wesentlich anzusehende Abstimmung zwischen der zeitlich und örtlich strukturierten Nachfrage und den vorhandenen beweglichen Produktionsmitteln, fast immer sind die Einzelfahrten unverknüpft. Die Modelle eignen sich also nur sehr bedingt zur Erfassung der wesentlichen Teile des Fahrplanungsproblems und sollen deswegen nicht als Fahrplanungsmodelle bezeichnet werden. Da sich an ihnen jedoch recht gut das Problem der Isomorphie zeigen läßt und in manchen Fällen die Übergänge zu Fahrplanungsmodellen nicht scharf abzugrenzen sind, sollen derartige Modelle im folgenden dargestellt werden.

b) Modelle mit der Struktur des Ernennungsproblems

In verkehrsbetrieblichen Modellen mit der Struktur des Ernennungsproblems könnten die Transportobjekte oder die Fahrzeuge als zuzuordnende input-Arten und die zu befahrenden Strecken bzw. Nachfragerelationen als Prozesse angesehen werden.

Die Zuordnungen von Transportobjekten zu den Relationen sind einem Verkehrsbetrieb durch die Nachfrage nach Ortsveränderungen, die durch Objekt, Abgangs- und Bestimmungsort gekennzeichnet ist,¹⁾ vorgegeben. Außerdem sind fast immer eine Vielzahl von Transportobjekten auf einer Relation zu befördern. Die Anwendung der Verfahren des Ernennungsproblems erübrigt sich also, da die Zuordnungen bereits festliegen. Es ist offensichtlich sinnlos, den einzelnen Relationen je ein Transportobjekt unter Vernachlässigung der tatsächlich gewünschten Ortsveränderungen zuzuordnen.

1) Auf die zeitliche Kennzeichnung kann bei einer Nachfrage, die nicht zerfällt und sich nicht kumuliert, verzichtet werden.

Sinnvoller ist die Zuordnung von Fahrzeugen zu Relationen. Es ist denkbar, daß sich Fahrzeuge für die einzelnen Strecken und die dort vorwiegend zu befördernden Transportobjekte in unterschiedlicher Weise eignen und mit unterschiedlichem Erfolg einzusetzen sind. Jedes Fahrzeug ist dann je einer Strecke so zuzuordnen, daß der Gesamterfolg aller Zuordnungen optimiert wird. In der Literatur findet sich eine Reihe von Beispielen für die Lösung dieses Problems. So wird von mehreren Grubenlokomotiven jeweils eine einer Strecke oder einem Abstellplatz zugeordnet¹⁾, je ein Omnibus ist für eine gleiche Zahl von Fahraufträgen oder Ruhezeiten vorzusehen,²⁾ je ein LKW soll je einer Strecke zugeteilt werden.³⁾

Die Besonderheit des Ernennungsproblems erlaubt jedoch nicht, mehr als 1 Fahrzeug einer Einsatzmöglichkeit zuzuordnen. Weiterhin wird bei der Erfolgsermittlung ein Fahrplan für jedes Fahrzeug entweder bereits vorausgesetzt oder es wird angenommen, daß die Festlegung von Abfahrts- und Ankunftszeiten ohne Einfluß auf den Erfolg bleibt. Schließlich läßt sich vor allem nicht der Übergang von einer Einsatzmöglichkeit zur anderen erfassen, die Einsatzmöglichkeiten stehen insofern völlig isoliert nebeneinander, Verknüpfungen können nicht berücksichtigt werden.

c) Modelle mit der Struktur des Transportproblems

11) Modelle mit örtlichen Zuordnungen

Man könnte zunächst vermuten, daß es sich bereits bei der anschaulichen Formulierung des Transportproblems um die Beschreibung eines verkehrsbetrieblichen Mo-

1) vgl. Lösch, E. G., Optimaler Einsatz von Grubenlokomotiven, in: Ablauf- und Planungsforschung, 3. Jahrgang (1962), S. 37 ff.

2) vgl. Kern, W., Ablauforganisation, a.a.O., S. 69 f.

3) vgl. Sasieni, Yaspán, Friedman, a.a.O., S. 95

dells handelt. Über die Art der Transportabwicklung auf den einzelnen Relationen gibt das Modell jedoch keinerlei Auskunft. Das eigentliche Problem beginnt für einen Verkehrsbetrieb erst dann, wenn seine Auftraggeber die je Relation zu befördernden Mengen festgelegt haben. Die Auftraggeber können ihre Aufträge dabei mit einem Transportmodell bestimmt haben.

Folgendes Problem ließe sich dagegen als Transportproblem formulieren: In einer Anzahl von Fahrzeugdepots stehen gleichartige Fahrzeuge bereit, die in zahlreichen Orten Ladung aufnehmen sollen. Die Fahrzeuge sind gleichartig in bezug auf ihre Verwendbarkeit und ihre Überführungsaufwendungen je Strecke. Gesucht wird die aufwendungsminimale Zuführung zu den Abgangsorten der Nutzfahrten. In der Literatur zur Unternehmensforschung finden sich zahlreiche Beispiele mit einer ähnlichen Modellstruktur.¹⁾

-
- 1) vgl. Vajda, S., Einführung in die Linearplanung und die Theorie der Spiele, 2. Aufl., München und Wien 1966, S. 11 ff.;
Kadlec, V., Vodáček, L., Lineare Optimierung im Transportwesen, Berlin 1967, S. 240 ff.;
Kern, W., Ablauforganisation, a.a.O., S. 107;
Gülicher, H., Eine Anwendung der Technik des linearen Programmierens zur Optimierung des Leerwagenumlaufs bei der Bundesbahn, in: Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, 115. Jahrgang (1959), S. 54 ff.;
Jándy, G., Optimale Transport- und Verkehrsplanung, Würzburg 1967, S. 114 ff. Bei dem auf S. 117 ff. angeführten Verfahren handelt es sich nicht, wie aus der Bezeichnung fälschlich hervorgeht, um die dynamische Programmierung, sondern um ein Verfahren des Transportproblems. Das Problem ist lediglich so gestellt, daß je Bestimmungsort mehrere Zeitpunkte der Bereitstellung möglich sind und verspätete Bereitstellungen mit einem Opportunitätskostenzuschlag belegt werden.

In den seltensten Fällen wird ein Verkehrsbetrieb allerdings sehr viele gleichartige Fahrzeuge innerhalb eines Zeitabschnitts verschiedenen Abgangsorten zuordnen müssen. Häufiger wird es sich nur um gleichartige Transportgefäße oder um verschiedenartige Fahrzeuge handeln. In diesen Fällen ist ein Modell mit der Struktur des Transportproblems bereits nicht mehr isomorph mit den zu lösenden Problemen.

Die leeren Transportgefäße sind zwar in bezug auf ihre Verwendungsmöglichkeiten gleichartig, nicht jedoch in bezug auf die Überführungsaufwendungen je Transportgefäßeinheit. Die Überführungsaufwendungen hängen von der Länge des zur Überführung benutzten Zuges ab. Je länger der von einem Aggregat gezogene Zug ist, desto geringere Überführungsaufwendungen werden im allgemeinen auf ein Transportgefäß entfallen, die Aufwendungen verlaufen also in Abhängigkeit von der Zuglänge degressiv. Das Lösungsverfahren des Transportproblems muß demgegenüber auf einheitlichen Aufwendungen je Transportgefäß und Strecke aufbauen. Diese Aufwendungen hängen jedoch von der durch die Lösung des Problems bestimmten Anzahl von Transportgefäßen je Zug ab.

Dies Dilemma läßt sich nur vermeiden, wenn man von einer vorgegebenen Zuglänge ausgeht.¹⁾ Damit hat das Modell dann wieder die gleiche Struktur wie bei der Verteilung gleichartiger Fahrzeuge, die Vorteile der losen Koppelung bleiben unberücksichtigt.

Ein ähnliches Dilemma liegt vor, wenn die Fahrzeuge ungleichartig sind. Statt der Fahrzeuge werden dann ersatzweise gleichartige Kapazitätseinheiten zugeord-

1) vgl. z.B. Gülicher, H., a.a.O., S. 54 ff.

net.¹⁾ Sind beispielsweise 3 LKW-Arten mit 10, 5 und 2 Tonnen Aufnahmefähigkeit, Abgangsorten für Nutzfahrten zuzuordnen, werden ersatzweise Kapazitätseinheiten von einer Tonne zugeordnet. Die Mängel dieser Modellkonstruktion liegen auf der Hand: Einmal sind die Aufwendungen für die Überführung einer Kapazitätseinheit je Strecke unterschiedlich, je nachdem, welche Fahrzeugart überführt wird. Zum anderen ist nicht sichergestellt, ob der errechnete Aufteilungsplan der Kapazitätseinheiten zu verwirklichen ist, da die Fahrzeuge nur in Kapazitätsblöcken von 10, 5 und 2 Tonnen eingesetzt werden können.

In den bisher dargestellten, entsprechend der Struktur des Transportproblems gestalteten Modellen werden nur leere Fahrzeugeinheiten oder Ersatzgrößen einer Strecke nur einmal zugeordnet, Verknüpfungen mehrerer Fahrten lassen sich nicht erfassen. Die Nutzfahrten liegen außerdem bereits fest, das Problem der Abstimmung zwischen Nachfrage und Einsatz der beweglichen Produktionsmittel wird also als gelöst betrachtet. Es sind nur noch die Leerfahrten auf die Nutzfahrten abzustimmen.

22) Modelle mit Zuordnungen zu Kombinationen von Zeit und Ort

Durch unkonventionelle Formulierung läßt sich in Anlehnung an das Transportproblem ein Modell konstruieren, das Zusammenhänge zwischen den Fahrzeugfahrten erfaßt, indem die Zuordnungen nicht nur zu Orten, sondern zugleich zu realisierbaren Zeiten erfolgen. Ausgangspunkt des Modells ist ein Fahrplan, der Abfahrts- und Ankunftszeiten in den Stationen enthält. Die Nutzfahrten liegen

1) vgl. z.B. Kadlec, V., Vodáček, L., a.a.O., S. 219ff.

also auch hier fest. Das Modell soll nun die geringste Fahrzeugzahl zur Erfüllung des Fahrplans ermitteln.

Die Möglichkeiten zur Verringerung der Zahl der Fahrzeuge lassen sich durch folgende Überlegungen zeigen: Geht man zunächst davon aus, daß für jede Nutzfahrt ein Fahrzeug vorzusehen ist, so werden offensichtlich sehr viele Fahrzeuge einzusetzen sein. Die Zahl der Fahrzeuge läßt sich aber offenbar dadurch verringern, daß von einem Fahrzeug mehrere Nutzfahrten durchgeführt werden, soweit das aufgrund der zeitlichen und örtlichen Lage der Nutzfahrten und der Fahrzeuggeschwindigkeiten möglich ist. Die Fahrzeugfahrten können dabei so eingeplant werden, daß mehrere Nutzfahrten aneinander anschließen oder daß zwischen zwei Nutzfahrten eine Leerfahrt eingeschaltet wird.

Dieses Problem wurde zuerst von Dantzig und Fulkerson für einen Tankerfahrplan formuliert.¹⁾ Grundsätzlich ist das Problem für jeden Verkehrsbetrieb für jede in sich homogene Gruppe beweglicher Mittel formulierbar. In der Literatur finden sich vor allem Beispiele aus Eisenbahnbetrieben.²⁾ Eine kurze und anschauliche Dar-

1) vgl. Dantzig, G.B., Fulkerson, D.R., Minimizing the Number of Tankers to meet a fixed Schedule, Naval Research Logistics Quarterly 1 (1954), S. 217-222.

2) vgl. zur Problemstellung: Sticht, W., Verfahren zur Bestimmung der günstigsten Umlaufpläne, Verkehrstechnische Woche, 31. Jahrgang (1937), S. 181 - 191;
Glück, H., Versuch zur Herstellung optimaler Laufpläne der Triebfahrzeuge auf der Großrechenanlage, in: Die Bundesbahn 40 (1966) S. 217 - 225;
vgl. zum Lösungsverfahren: Moreno, J., Anwendung der Betriebsforschung (Operations Research) auf die Diensterteilung im Fahrdienst, Monatsschr.d. Internationalen Eisenbahn-Kongreß-Vereinigung, 1963, S. 732 - 737;

stellung der Lösung dieses Problems gibt Vajda an.¹⁾ Die Lösungsschemata der üblichen Verfahren des Transportproblems sind der neuen Problemstellung entsprechend umzuformulieren. "Versendungsorte" sind Ankunftsort-Ankunftszeit-Kombinationen, "Empfangsorte" sind Abfahrtsort-Abfahrtszeit-Kombinationen. Die "Empfangsorte" sind nun durch möglichst zahlreiche Leerfahrten der Fahrzeuge von den "Versendungsorten" aus zu bedienen. Dadurch wird zugleich die Zahl der einzusetzenden Fahrzeuge minimiert. Unzulässig sind die Leerfahrten, die einen Abfahrtsort nicht mehr rechtzeitig zur Abfahrtszeit erreichen. Ist ein Ort zugleich Ankunfts- und Abfahrtsort, kann die Wartezeit auf die nächste Abfahrtszeit als Scheinleerfahrt interpretiert werden.²⁾ Unter den mit minimaler Fahrzeugzahl möglichen Umlaufplänen kann schließlich außerhalb der Lösungsmethoden derjenige mit den wenigsten tatsächlichen Leerfahrtskilometern gewählt werden.³⁾

1) vgl. Vajda, S., a.a.O., S. 41 f.;

2) vgl. Hörnke, H., Zwahlen, B., Dienstenteilung I, a.a.O., S. 95;

3) vgl. Meyer, M., a.a.O., S. 121 f.;

Fortsetzung von S. 117

Hörnke, H., Zwahlen, B., Das Problem der Dienstenteilung von Lokomotiven, in: Unternehmensforschung 10 (1966), im folgenden zitiert als "Dienstenteilung I", S. 92 - 100;

Meyer, M., Zum Problem der optimalen Dienstenteilung von Lokomotiven, in: Unternehmensforschung 11 (1967), S. 119 - 123;

Hörnke, H., Zwahlen, B., Weitere Bemerkungen zum Problem der Dienstenteilung von Lokomotiven, in: Unternehmensforschung 12 (1968), S. 71 - 78; vgl. zu einer praktischen Anwendung: Brettmann, E., Betriebsplanung mit Methoden der Kybernetik, in: Die Bundesbahn 42 (1968), S. 813 - 828;

Statt der üblichen Verfahren zur Lösung des Transportproblems kann ein äquivalentes Verfahren aus der Graphentheorie angewandt werden, das den Lösungsgang aufgrund der besonderen Problemstruktur vereinfacht.¹⁾

Die Modelle mit der soeben dargestellten Struktur erfassen wegen der Einbeziehung der tatsächlichen Bewegungsmöglichkeiten der Fahrzeuge zwar die Verknüpfungen von Fahrten. Ein wesentliches Problem der Fahrplanung wird jedoch als bereits gelöst vorausgesetzt. Die Fahrzeugnutzfahrten, also die zeitlichen und örtlichen Zuordnungen der Fahrzeuge zur Befriedigung der Nachfrage, liegen bereits fest. Ein Fahrplan der Nutzfahrten existiert bereits und ist nicht mehr das Ergebnis der mit dem Modell dargestellten Planung.

Vorrangiges Ziel ist zudem die Minimierung der Zahl der eingesetzten Fahrzeuge. Erst unter den mit minimaler Fahrzeugzahl möglichen Plänen wird der aufwandsgünstigste nachträglich herausgesucht. Diese vorrangige Minimierung der Zahl der eingesetzten Fahrzeuge ist nur dann sinnvoll, wenn die Fahrzeugzahl einen Engpaß darstellt oder wenn ermittelt werden soll, ob ein bestehender Fahrplan mit den vorhandenen Fahrzeugen erfüllt werden kann. Meyer nennt als Grund für die Minimierung der Fahrzeugzahl die Absicht, die Kapitalkosten zu minimieren.²⁾ Die Minimierung der Kapitalkosten stellt für die kurzfri-

1) vgl. Ford, L. R., Fulkerson, D. R., Flows in Networks, Princeton 1962, S. 64 ff.

Moreno, J., a.a.O., S. 735 ff.

Hörnke, H., Zwahlen, B., Diensterteilung I, a.a.O., S. 94.

2) vgl. Meyer, M., a.a.O., S. 120.

stige Fahrplanung aber kein sinnvolles Ziel dar, denn nicht die Zahl der eingesetzten Fahrzeuge, sondern die Investitionsausgaben für die im Verkehrsbetrieb vorhandenen Fahrzeuge bestimmen die Kapitalkosten.

33) Modelle mit festgelegter Nutzfahrt-Leerfahrt
Abfolge

Kadlec und Vodáček beschreiben ein Verfahren, das folgendes Problem erfaßt¹⁾: Mehrere Aufträge sind durch je einen Ausgangs- und Bestimmungsort festgelegt. Ein und derselbe Ort kann für die Aufträge immer nur Ausgangs- oder Bestimmungsort sein. In den Ausgangsorten steht eine unbegrenzte Anzahl gleichartiger Fahrzeuge bereit. Sie sind gleichartig in bezug auf den Fahrtaufwand je Strecke und in bezug auf die Aufnahmefähigkeit für je einen Auftrag. Anstatt von einer unbegrenzten Fahrzeugzahl auszugehen, kann auch angenommen werden, daß es nicht mit Aufwand verbunden sei, die jeweils erforderlichen Fahrzeuge bereitzustellen.

Da die Fahrzeuge nur einen Auftrag annehmen können, ist mit einem Auftrag immer nur eine Nutzfahrt von einem Ausgangsort zu einem Bestimmungsort möglich. Weil der Bestimmungsort gemäß dem vorgegebenen Problem nie zugleich ein Ausgangsort sein kann, muß sich an eine Nutzfahrt immer eine Leerfahrt zu einem der Ausgangsorte für Aufträge anschließen. Der erste Ausgangsort des Fahrzeugs braucht aber nicht sofort wieder angefahren zu werden, erst wenn alle vorgege-

1) vgl. Kadlec-Vodáček, a.a.O., S. 240 ff.

benen Aufträge erfüllt sind, muß ein Fahrzeug wieder an den ursprünglichen Ausgangsort, von dem aus die erste Fahrt begonnen wurde, zurück. Bedingungen über den Rückkehrzeitpunkt eines Fahrzeugs oder zeitliche Bedingungen für Aufträge werden im Modell nicht berücksichtigt.

Die Nutzfahrten der Fahrzeuge sind durch Ausgangs- und Bestimmungsorte der Aufträge eindeutig festgelegt. Da die Fahrzeuge jedoch nicht vor dem Ende der Planungsperiode an ihren ursprünglichen Ausgangsort zurückkehren müssen, besteht ein Spielraum für die Festlegung der Leerfahrten von den Bestimmungsorten zurück zu den Ausgangsorten der Aufträge.

Gesucht wird die geringste Summe der Aufwendungen für Leerfahrten, oder, bei entfernungsproportionalen Aufwendungen, das Entfernungsminimum aller Leerfahrten. Da die Nutzfahrten festliegen, ist dies zugleich die optimale Lösung des Gesamtproblems.

Die Bestimmungsorte, in denen entladene Fahrzeuge bereitstehen, müssen nun als die "Versendungsorte", die Ausgangsorte der Aufträge als die "Empfangsorte" eines Transportproblems gedeutet werden. Die Fahrzeuge stellen die kostenoptimal aufzuteilende "Güterart" dar. Es liegt somit ein Transportproblem vor, das mit den üblichen Verfahren zu lösen ist.

Im Anschluß an das Transportproblem sind die Nutzfahrten und die Leerfahrten durch Probieren zu Routen zusammenzustellen, die mit dem gleichen ursprünglichen Ausgangsort eines Fahrzeugs beginnen und enden. Dieses Vorgehen stellt sicher, daß die entfernungsminimalen Leerfahrten beibehalten werden und gleich-

zeitig die Bedingung eingehalten wird, daß am Ende der Planungsperiode die Fahrzeuge in ihre ursprünglichen Ausgangsorte zurückkehren. Je mehr Verknüpfungen von Fahrten zu Routen gelingen, desto weniger Fahrzeuge werden benötigt, weil bei steigender Zahl von Verknüpfungen mit einem Fahrzeug mehr Nutzfahrten abgewickelt werden können. Die genauen Fahrzeiten der Fahrzeuge müssen in einer Detailplanung festgelegt werden. Sie bleiben jedoch gemäß den Modellvoraussetzungen ohne Einfluß auf die Zielverwirklichung.

Auch in Modellen mit der zuletzt beschriebenen Struktur liegen die Nutzfahrten zur Befriedigung einer gegebenen Nachfrage bereits vor der Modelllösung fest. Geplant werden nur noch die Leerfahrten der gleichartigen Fahrzeuge. Aufgrund der sehr speziellen Modellstruktur lassen sich Abfolgen von Leer- und Nutzfahrten bilden, so daß Verknüpfungen von Fahrten möglich sind.

44) Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen: Mit Modellen, die die Struktur des Transportproblems aufweisen, lassen sich im allgemeinen nur einmalige Leerfahrten gleichartiger Fahrzeuge mit dem Ziel minimaler Leerfahrt-aufwendungen planen. Die Nutzfahrten liegen fest und bilden den Ausgangspunkt der Planung.

Verknüpfungen mehrerer Fahrten sind mit den Modellen nur bei spezieller Modellformulierung zu erfassen. Dies ist einmal dadurch möglich, daß nicht örtliche

Zuordnungen sondern Zuordnungen zu Kombinationen von Zeit und Ort geplant werden. Eine "Strecke" ist dann durch zwei solcher Zeit-Ort-Kombinationen gekennzeichnet. Zulässig sind nur die Zeit-Ort-Kombinationen, die durch Fahrzeugfahrten verknüpfbar sind.

Verknüpfte Fahrten lassen sich zum anderen durch die Modellvorschrift erreichen, daß auf jede Nutzfahrt eine Leerfahrt folgen muß. Die Leerfahrten mit minimalen Aufwendungen lassen sich in diesen Fällen mit den Nutzfahrten zu Routen verbinden.

d) Modelle mit der Struktur des allgemeinen linearen Zuordnungsproblems

Modelle mit der Struktur des allgemeinen linearen Zuordnungsproblems bieten bei einem Vergleich mit dem Ernennungsproblem die Möglichkeit, jedem Bestimmungsort oder jeder Relation mehrere Fahrzeug-Einheiten zuzuordnen. Bei einem Vergleich mit dem Transportproblem bietet die allgemeine Formulierung den Vorteil, daß jeder der Relationen mehrere verschiedenartige Fahrzeuge zugeordnet werden können. Die Zuordnung von Transportobjekten zu Relationen ist auch hier sinnlos, ebenso wie Verknüpfungen von Fahrten ohne besondere Verfahren nicht möglich sind.

Das bekannteste Beispiel für die Anwendung der linearen Programmierung auf Probleme der Einsatzplanung in Verkehrsbetrieben wurde zuerst von Ferguson und Dantzig in zwei Fassungen dargestellt. In der ersten Fassung wird von einem Erwartungswert für die Nachfrage jeder Strecke ausgegangen.¹⁾ In der

1) Ferguson, A. R., Dantzig, G. B., The Problem of Routing Aircraft, in: Aeronautical Engineering Review, Vol. 14 (1955), S. 51 f. zitiert nach Vajda, S., a.a.O., S. 48

zweiten Fassung wird eine bekannte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Nachfrage je Strecke angenommen.¹⁾ In deutscher Übersetzung liegen beide Fassungen bei Vazsonyi und Dantzig vor.²⁾ Kurzfassungen finden sich bei Vajda³⁾ und Kern.⁴⁾

Das Problem läßt sich kurz folgendermaßen kennzeichnen: Mehrere Flugzeuge sind mehreren Strecken optimal zuzuordnen. Für jede Strecke ist die Gesamtnachfrage und der Beförderungspreis je Passagier gegeben. Der Nachfrage stehen verschiedenartige Flugzeugtypen gegenüber. Die Flugzeuge weisen eine unterschiedliche Aufnahmefähigkeit auf, die je Flugzeug und Strecke in einem konstanten Verhältnis ausgelastet ist. Jede Zuordnung eines Flugzeugtyps zu einer Strecke ist je Strecke mit unterschiedlichen Aufwendungen verbunden. Die durch Flugzeugzuordnungen nicht erfaßte Nachfrage einer Strecke verursacht Opportunitätskosten in Höhe des mit den Beförderungspreisen bewerteten Nachfrageausfalls. Zu minimieren sind die aus Flugaufwand und Opportunitätskosten zusammengesetzten Kosten.

In der deutschen Übersetzung wird, statt der genaueren Kennzeichnung dieses Problems als "Allocation of Aircraft to Routes"⁵⁾, etwas mißverständlich vom Auf-

-
- 1) vgl. Ferguson, A. R., Dantzig, G. B., The Allocation of Aircraft to Routes. An Example of Linear Programming under Uncertain Demand, in: Management Science, Vol. 3 (1957), S. 45 - 73
 - 2) vgl. Vazsonyi, a.a.O., S. 75 ff. und Seite 154 ff. Dantzig, G. B., a.a.O., S. 644 ff.
 - 3) vgl. Vajda, S., a.a.O., S. 48 ff.
 - 4) Kern, W., Ablauforganisation, a.a.O., S. 77
 - 5) Ferguson, A. R., Dantzig, G. B., The Allocation of Aircraft to Routes a.a.O., S. 45

stellen eines Fahrplans gesprochen.¹⁾ Das Modell löst aber nicht das Problem der Planung von Abfahrts- und Ankunftszeiten, sondern setzt im Gegenteil einen Fahrplan bereits voraus bzw. unterstellt, daß ein Fahrplan, der einen im voraus festgelegten Auslastungsgrad garantiert, ohne Schwierigkeiten aufgestellt werden kann.

Das Modell bietet also nur die bereits genannten Vorteile gegenüber dem Transport- und Ernennungsproblem: Die zuzuordnenden Fahrzeuge können bezüglich Aufnahme-fähigkeit und Bewertung je Zuordnungsmöglichkeit unterschiedlich sein, und es können einer Strecke mehrere Fahrzeuge zugeordnet werden. Wegen der möglichen unterschiedlichen Bewertungen lassen sich nun auch Nutzfahrten mit unterschiedlichen Erträgen planen.

Die größere Isomorphie allgemeiner linearer Zuordnungsmodelle zum Fahrplanungsproblem wird jedoch durch eine erschwerte Lösbarkeit der Modelle erkauft. Erschwerend kommt als weiterer Nachteil hinzu, daß die üblichen Lösungsverfahren nicht die Ganzzahligkeit der Lösungen garantieren. Nichtganzzahlige Lösungen sind unrealistisch, da sie unvollständige Fahrten repräsentieren. Es gibt zwei Möglichkeiten, unvollständige Fahrten aus der Lösung zu eliminieren, Abrunden und Anwendung der ganzzahligen Programmierung. Rundet man die Lösung auf ganze Fahrten ab, verzichtet man auf eine optimale Lösung. Die zweite Möglichkeit, die Anwendung der ganzzahligen Programmierung, erlaubt die Ermittlung ganzzahliger, optimaler Lösungen, bedingt dafür aber langwierige und umständliche Rechenoperationen.

1) vgl. Dantzig, G.B., a.a.O., S. 645

Das Lösungsverfahren der ganzzahligen Programmierung beruht auf folgender Idee: Wird mit den üblichen Verfahren der linearen Programmierung eine unzulässige, nicht ganzzahlige Lösung erreicht, sind Nebenbedingungen einzuführen, die diese Lösung ausschließen, nicht aber die Menge der ganzzahligen Lösungen. Die erst während des Lösungsverfahrens eingeführten Nebenbedingungen ersparen die explizite Angabe der Ganzzahligkeitsbedingungen. Der Problemumfang ist davon abhängig, wieviele solcher Nebenbedingungen im Einzelfall erforderlich sind, um die optimale, ganzzahlige Lösung eines Modells zu erreichen. Der erforderliche Rechenaufwand ist im allgemeinen so groß, daß nur kleinere Modelle gelöst werden können.¹⁾

3) Modelle mit ausreichender Isomorphie zum Fahrplanungsproblem

a) Vorbemerkung

Die nun darzustellenden Modelle erfassen sowohl die Planung von Nutzfahrten als auch die Verknüpfung von Fahrten. Sie weisen also eine größere Isomorphie mit dem Fahrplanungsproblem auf. Demgegenüber ist die Lösbarkeit der Modelle geringer. In den meisten Fällen muß auf eine exakte Lösung verzichtet werden, da sich die Fahrten meist nur vor oder nach der exakten Lösung von Zuordnungsmodellen verknüpfen lassen.

1) vgl. Dantzig, G. B., a. O., S. 589 ff.;
Manne, A. S., a.a.O., S. 93 ff.

Entsprechend der Verknüpfungsmethode ist eine Einteilung der Modelle in Modelle mit nachträglich und mit vorher zu verknüpfenden Fahrten möglich. Zunächst soll auf Modelle mit nachträglich zu verknüpfenden Fahrten eingegangen werden.

b) Fahrplanungsmodelle mit nachträglich zu verknüpfenden Nutzfahrten

Rao und Zionts formulieren ein Fahrplanungsproblem als allgemeines lineares Zuordnungsmodell, das mit speziellen Verfahren der allgemeinen linearen Programmierung gelöst werden kann.¹⁾ Sie geben zwei Modellformulierungen an: Bei der ersten Formulierung müssen die zu befahrenden Routen nachträglich durch Verknüpfung der Einzelfahrten gebildet werden, bei der zweiten sind die möglichen Routen bereits im voraus zu bilden. An dieser Stelle soll die erste Modellformulierung dargestellt werden.

Gegeben sind eine Anzahl von Fahrzeugen, beispielsweise Schiffe. Jedes der Schiffe hat eine qualitative und quantitative Kapazität für Ladungen. Die Schiffe sind weiterhin durch ihre Eignung für bestimmte Häfen p und durch ihre Reisegeschwindigkeit $t_k(ij)$ zwischen den Häfen i und j gekennzeichnet. Den durch die Schiffe gegebenen Fahrtmöglichkeiten stehen Aufträge b_{ij} in der Größe von jeweils einer Schiffsladung gegenüber. Die Aufträge sind durch Ladehafen i und Löschhafen j gekennzeichnet. Falls

1) vgl. Rao, M. R., Zionts, S., Allocation of Transportation Units to Alternative Trips - A Column Generation Scheme with out-of-kilter Subproblems, in: Operations Research 16 (1968), S. 52 - 63.

mehr als eine Ladungsart zwischen zwei Häfen zu transportieren ist, werden entsprechende Scheinhäfen zusätzlich in das Problem aufgenommen. Differenzierte Zeitgrenzen sind nicht definiert, die Aufträge müssen lediglich innerhalb der Planungsperiode abgewickelt werden.

Entscheidungsvariable sind die Nutzfahrten $x_k(ij)$ und die Leerfahrten $y_k(ij)$ mit den Schiffen k von den Häfen i zu den Häfen j . Hinzu kommt noch die Möglichkeit, Schiffe zu chartern. Dadurch ist eine weitere Entscheidungsvariable $d(ij)$ zu berücksichtigen, die die durch Charterschiffe zwischen den Häfen i und j zu befördernden Tonnen einer Ladungsart repräsentiert. Die mit den Entscheidungsvariablen festzulegenden Beförderungsmöglichkeiten müssen die gegebenen Aufträge erfüllen können. Die Möglichkeit, Schiffe zu chartern, stellt sicher, daß das Problem einer Auswahl aus den gegebenen Aufträgen und damit der Bewertung der Aufträge mit Erträgen nicht auftaucht.

Bei der Festlegung der Entscheidungsvariablen ist darauf zu achten, daß die je Schiff innerhalb der Planungsperiode zur Verfügung stehende Zeit h_k durch den Zeitbedarf t_k für die Fahrten nicht überschritten wird. Schließlich muß durch eine umfangreiche Gruppe von Kontrollgleichungen sichergestellt werden, daß die Fahrten eines Schiffes in einen Hafen hinein gleich den Fahrten des gleichen Schiffes aus dem Hafen heraus sind. Ergänzt werden diese Nebenbedingungen durch die für lineare Programme üblichen Nicht-Negativitätsbedingungen.

Jede Festlegung einer Nutzfahrt, Leerfahrt oder Charterfahrt bedingt einen Aufwand. Die Aufwendungen müssen proportional zur Größe der Entscheidungsvariable

riablen (zum Prozeßniveau) sein. Diese linearen Abhängigkeiten werden in einer Zielfunktion festgehalten. Die Entscheidungsvariablen sind so festzulegen, daß innerhalb der Nebenbedingungen eine Lösung mit minimalem Aufwand gefunden wird.

Die Lösung dieses bereits bei einer kleinen Anzahl Schiffen, Ladungen und Häfen sehr umfangreichen Modells ist noch nicht als Grundlage für einen Fahrplan verwendbar, denn das Lösungsverfahren stellt nicht sicher, daß die Zuordnungen zu Fahrten verknüpft sind und daß nur jeweils ganze Fahrten in der Lösung vorkommen. In einem an die Lösung des Zuordnungsmodells anschließenden Schritt müssen also die Fahrten verknüpft, nichtganzzahlige Werte abgerundet werden. Die auf diese Weise erhaltenen Lösungen werden vom theoretisch möglichen Optimum abweichen.

Anstatt des Abrundens könnte die lineare Programmierung durch Verfahren des ganzzahligen Programmierens ergänzt werden, wodurch allerdings ein noch wesentlich umfangreicheres Programm entstünde.

Für die Verknüpfung der unzusammenhängenden Fahrten eines Fahrzeugs gibt es in diesem Zusammenhang kein exaktes Verfahren. Die Kenntnis einer unteren Grenze durch die Lösung des linearen Programms bietet jedoch einen Anhaltspunkt für Probiervverfahren.

c) Fahrplanungsmodelle mit vorher zu verknüpfenden Nutzfahrten

Anstatt einzelne Fahrten als Entscheidungsvariable zu wählen, kann man vor der Anwendung der Verfahren der linearen Programmierung die Einzelfahrten zu

Routen verknüpfen. Die Verknüpfung erfolgt wiederum außerhalb der exakten Verfahren. Je nach der Anzahl der je Route möglichen Verknüpfungen von Einzelfahrten steigt die Anzahl der Entscheidungsvariablen um ein Vielfaches überproportional an.

Diese Problemformulierung bietet aber auch Vorteile. Kann jedes Fahrzeug die möglichen Routen nur von einem bestimmten Ausgangsort aus befahren, erübrigt sich eine Verknüpfung unverbundener Fahrten. Ein wesentlicher Vorteil der Routenformulierung besteht in jedem Fall darin, daß die Kontrollgleichungen, die sicherstellen, daß die Fahrten eines Schiffes in einen Hafen gleich den Fahrten aus ihm heraus sind, wegfallen können.¹⁾

Rao und Zions beschreiben für die Problemformulierung mit Routen einen Algorithmus, der im Gegensatz zur üblichen Simplexmethode nicht die Kenntnis sämtlicher Entscheidungsvariablen bei jeder Iteration erfordert.²⁾ Dieses Verfahren ermöglicht bei entsprechend geeigneter Problemstruktur die Lösung großer Probleme. Die Ganzzahligkeit der Fahrten wird aber auch durch dieses Verfahren nicht garantiert.

Charnes und Miller befassen sich mit dem Fahrplanungsproblem einer amerikanischen Eisenbahngesellschaft, die innerhalb ihres lokalen Eisenbahnnetzes Waggons für große Fernliniengesellschaften von einem Fernnetz auf das andere umrangierte oder für große Firmen den Verkehr zwischen deren Produktionsstätten übernimmt. Dieser in Europa unbekannte Typ eine Eisenbahngesellschaft wird als Terminal Switching Railroad bezeichnet.³⁾

-
- 1) vgl. Rao, M.R., Zions, S., a.a.O., S. 33
2) vgl. Rao, M.R., Zions, S., a.a.O., S. 57;
vgl. zum Verfahren: Dantzig, G.L., a.a.O., S. 507-533;
Ford, L.R.; Fulkerson, D.R., a.a.O., S. 162 - 169
3) vgl. Charnes, A., Miller, M.H., A Model for the optimal Programming of Railway Freight Train Movements, in: Management Science 3 (1957), S.74 ff.

Das Fahrpersonal dieser Gesellschaft muß für jeweils eine Arbeitsperiode von 8 Stunden beschäftigt und bezahlt werden. Als Arbeitszeit zählt nach den tarifvertraglichen Abmachungen die Ausbleibezeit vom Heimatbahnhof. Auf Grund von Überlegungen vor der Aufstellung des Modells erweist es sich als ungünstig, die Arbeitszeit von 8 Stunden zu überschreiten. Übernachtungen außerhalb der Heimatorte sollen nicht in die Überlegungen einbezogen werden. Außerdem soll das Fahrpersonal jeweils auf dem eigenen Zug bleiben und nicht auf anderen Zügen (= "deadheading")¹⁾ oder mit anderen Verkehrsmitteln in den Heimatort zurückkehren. Die Restriktionen machen es erforderlich, Routen für das Fahrpersonal und gleichzeitig für die Aggregate festzulegen. Die Aggregate sind hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Fahrtaufwendungen gleichartig. Die Routen müssen in einem Ort beginnen und enden, und die Fahrt über eine der Routen darf höchstens 8 Stunden in Anspruch nehmen. Ein nachträgliches Verknüpfungproblem kann bei dieser Problemformulierung nicht mehr auftreten.

Dadurch die Routenbefahrungen gegebenen Beförderungsmöglichkeiten stehen Beförderungsaufträge für die Waggonen gegenüber. Zwischen 2 Stationen kann mit einer Aggregatfahrt jeweils nur 1 Auftrag erfüllt werden, da es sich bei den Aufträgen immer um vollständige Züge handeln soll. Diese Beförderungsaufträge sind durch Abgangs- und Bestimmungsbahnhöfe gekennzeichnet. Es liegen nur Aufträge zwischen benachbarten Bahnhöfen vor, jeder Bahnhof kann aber zugleich Abgangs- und Bestimmungsort sein. Da eine Routenbefahrung mehrere Abgangs- und Bestimmungsbahnhöfe berührt, können mit einer Befahrung mehrere Aufträge erfüllt werden.

1) vgl. Charnes, A., Miller, M. H., a.a.O., S. 77.

Differenzierte Zeitgrenzen für die Beförderungsaufträge sind nicht gegeben, Bedingung ist lediglich die Beförderung innerhalb der durch die Arbeitszeit begrenzten Periode. Ein Aufschieben der Beförderung, etwa um besonders lange Züge zusammenstellen zu können, ist nicht erlaubt. Ebenso nicht erlaubt, außerdem innerhalb der Planungsperiode nicht möglich, ist die Bildung langer Züge zu Sammelpunkten und das Umrangieren in kleinere Züge zum Verteilen der Waggon in die endgültigen Bestimmungsorte. Die Anzahl und Verteilung der Aggregate auf die Stationen sowie die Kapazität der Gleise und Stationen werden nicht im Modell berücksichtigt, es wird angenommen, daß Kapazität und Aggregate unbeschränkt zur Verfügung stehen.

Die möglichen Befahrungen der Routen sind die Entscheidungsvariablen. Mit jeder Befahrung ist ein bestimmter Aufwand verbunden. Gesucht werden die Routenbefahrungen, die den geringsten Aufwand nach sich ziehen und die die Erfüllung aller Aufträge erlauben. Die Routen stellen also die Prozesse, die zugeordneten Aggregate mit dem Fahrpersonal die input-Mengen je Prozeß eines Zuordnungsproblems dar.

Diese Problemstruktur entspricht somit der des allgemeinen linearen Zuordnungsmodells. Besondere Eigenheiten der Struktur des Modells erlauben es außerdem, ganzzahlige Lösungen zu erreichen. Charnes und Miller zerlegen zu diesem Zweck die Routenbefahrungen wieder in einzelne Teilfahrten, die entweder Nutz- oder Leerfahrten sein können.¹⁾ Die Routenbefahrungen bleiben weiterhin als Entscheidungsvariable im Modell.

1) vgl. Charnes, A., Miller, E.H., a.a.O., S. 60

Während eine vollständige Routenbefahrung mehrere Auftragseinheiten erfassen kann, zieht die Zuordnung zu einer Teilfahrt jeweils nur die Änderung einer Auftragseinheit oder einer Leerfahrteinheit nach sich. Die Koeffizienten der Prozesse bzw. der Gleichungen und Ungleichungen betragen daher jeweils 1 oder -1, 1 für Nutzfahrten, -1 für Leerfahrten. Wie beim Transportproblem kann wegen dieser Koeffizienten und dem Zwang zur Erfüllung aller Aufträge beim Lösen der Gleichungen kein Bruch auftreten, so daß ganzzahlige Lösungen erzielt werden.

Wenn allerdings Nutzfahrten nur auf Teilen einer Route in der Lösung verbleiben würden, wäre damit die Routenformulierung durchbrochen, unverknüpfte Zuordnungen wären die Folge. Um dies zu verhindern, wird den Teilfahrten ein sehr großer Wert M beigeordnet, der verhindert, daß die Teilfahrten in der endgültigen Lösung erscheinen. Die Leerfahrten haben den Wert 0, sie erscheinen in der Lösung zusammen mit den entsprechenden Routen, denen als tatsächlichen Entscheidungsvariablen der ihnen zurechenbare Aufwand angelastet wird. Wegen der Bedingungsgleichung, die den Zwang zur Beförderung aller Aufträge ausdrückt, besteht nicht die Möglichkeit, daß nur Leerfahrten in der Lösung auftreten.

Dies letzte Beispiel eines Zuordnungsproblems zeigt, daß in besonders einfach gelagerten Fällen verknüpfte Fahrten und ganzzahlige Lösungen erreichbar sind, ohne daß auf Probiervverfahren zurückgegriffen werden muß.

II. Die Interpretation des Fahrplanungsproblems als kombinatorisches Problem

1) Kennzeichnung der Struktur kombinatorischer Probleme

Die Struktur kombinatorischer Probleme läßt sich am besten durch einen Vergleich mit den Zuordnungsproblemen verdeutlichen. Gemeinsam ist beiden Problemstrukturen ein Gesamtsystem, das sich in Prozesse zerlegen läßt. Der Erfolg der Systeme ist in unterschiedlicher Weise von den Prozeßniveaus abhängig.

Bei den Zuordnungsproblemen ist der mit einem Prozeß erzielbare Teilerfolg proportional oder linear vom Prozeßniveau abhängig. Der Gesamterfolg ergibt sich aus der Addition der Teilerfolge. Die lineare Abhängigkeit der Teilerfolge von den Prozeßniveaus und die Additivität der Teilerfolge ermöglichen die Anwendung effizienter Lösungsverfahren. Beim allgemeinen linearen Zuordnungsproblem bildet zudem die Möglichkeit der kontinuierlichen Variation der Prozeßniveaus eine wesentliche Voraussetzung für die Lösungsverfahren.

Kombinatorische Probleme sind demgegenüber dadurch zu kennzeichnen, daß zwischen den Prozessen Abhängigkeiten bestehen, die es unmöglich machen, Teilerfolge der Prozesse zu ermitteln. Der von den Prozeßniveaus determinierte Gesamterfolg des Systems läßt sich somit nicht mehr als Summe von Teilerfolgen darstellen. Stattdessen müssen jeweils die vollständigen Kombinationen der Prozeßniveaus bewertet werden. Dies bedeutet mit anderen Worten, daß sämtliche Alternativen eines Systems aufzählt, bewertet und verglichen

werden müssen. Es ist also eine totale Enumeration der Alternativen erforderlich. Ein weiteres Merkmal kombinatorischer Probleme sind Prozeßniveaus, die nicht kontinuierlich, sondern nur in diskreten Schritten veränderlich sind.

Probleme mit der soeben beschriebenen totalen Interdependenz der Prozeßniveaus sind wegen der unzähligen zu bewertenden Alternativen praktisch unlösbar. Lösungsmöglichkeiten ergeben sich erst, wenn die Interdependenz der Prozesse unvollständig ist. Diese besondere Problemstruktur gilt es dann zu erkennen, um die totale Enumeration sämtlicher Alternativen zu vermeiden. Die zur Lösung derartiger Probleme entwickelten Lösungsverfahren oder besser Lösungsprinzipien können als implizite Enumeration von Alternativen, als kombinatorische oder diskrete Programmierung bezeichnet werden.¹⁾

Zu diesen Verfahren ist vor allem die Methode des Branch and Bound zu zählen. Sie beruht auf folgenden Überlegungen:²⁾ Grundsätzlich sind sämtliche Alternativen eines Modells systematisch in Betracht zu ziehen.

1) vgl. Dantzig, G.B., a.a.O., S. 583 f.
Little, J.D.C., Murty, K.G., Sweeney, D.W., Karel, C., An Algorithm for the Travelling Salesman Problem, in: Operations Research 10 (1963), S. 973
Pierce, J.F., On the Truck Dispatching-Problem, Part I, Cambridge, Scientific Center, Technical Report 320/2018 (unveröffentlichtes Manuskript), 1967, S.2
"By combinatorial programming we mean procedures developed on the bases of two principal concepts: The use of a controlled enumerative technic for (implicitly) considering all potential solutions and the elimination from explicit consideration of particular potential solutions..."

2) vgl. Pierce, J.F., a.a.O., S. 2.
Jeschke, G., "Branching and Bounding" - eine allgemeine Methode zur Lösung kombinatorischer Probleme, in: Ablauf- und Planungsforschung 5 (1964), S. 133 - 155.

Dabei können jedoch entsprechend der Struktur des Einzelfalles Gruppen von Alternativen gebildet werden. Über den Wert der im günstigsten Fall zu verwirklichenden Alternative der Gruppe müssen sich Aussagen machen lassen, ohne alle Alternativen der Gruppe im einzelnen untersuchen zu müssen. Findet man nun eine Alternative, die günstiger zu bewerten ist als die beste Alternative der ersten Gruppe, so können alle Alternativen der ersten Gruppe von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden, da sie offensichtlich von der ermittelten besseren Alternative dominiert werden.

In manchen Fällen brauchen Gruppen von Alternativen nicht bewertet zu werden, da sich feststellen läßt, daß sie unzulässig sind, so daß diese Gruppen von der weiteren Untersuchung eliminiert werden können. Neben der Methode des Branch and Bound ist auch die bereits erwähnte ganzzahlige Programmierung und die später noch zu erläuternde Methode der dynamischen Programmierung zu den Methoden des kombinatorischen Programmierens zu zählen.¹⁾

Fahrplanungsmodelle mit kombinatorischer Problemstruktur weisen zum Fahrplanungsproblem eine stärkere Isomorphie auf als Zuordnungsmodelle, da sie interdependente Fahrten besser erfassen können. Sie haben dafür den Nachteil, daß sie schwerer zu lösen sind. Anhand von 2 Fahrplanungsmodellen soll im nächsten Abschnitt der Übergang vom gut lösbaren, weniger isomorphen Zuordnungsmodell zum isomorphen, weniger gut lösbaren kombinatorischen Modell dargestellt werden.

1) vgl. Dantzig, G.B., a.a.O., S. 583 f.
Jeschke, G., a.a.O., S. 133 f.
Pierce, J.W., a.a.O., S. 2

2) Aus Zuordnungsmodellen entwickelte, kombinatorische Fahrplanungsmodelle

Minas und Mitten formulieren ein Modell¹⁾, das von stark vereinfachenden Annahmen über die Fahrtmöglichkeiten der Fahrzeuge ausgeht.

Ein zentraler Ort ist durch direkte Verbindungen sternförmig mit mehreren Außenstationen verbunden. Zwischen den Außenstationen bestehen keine Verbindungen. In den Stationen steht eine begrenzte Zahl gleichartiger Fahrzeuge, die die Fahrtmöglichkeiten bestimmen, bereit. Innerhalb der Entscheidungsperiode kann ein Fahrzeug je nach Standort jeweils eine Fahrt ausführen, von der zentralen Station nach außen oder umgekehrt. Den Fahrtmöglichkeiten stehen auf jeder der Relationen Aufträge in Form von ganzen Fahrzeugladungen gegenüber. Es können 2 Entscheidungssituationen in jeder Station unterschieden werden. Sind genügend Fahrzeuge vorhanden, müssen alle Aufträge abgewickelt werden. Bei zu wenig Fahrzeugen müssen die Aufträge in eine Rangfolge gebracht werden. Ordnungskriterium sind dann die mit der Nichterfüllung verbundenen Opportunitätskosten oder entgangenen Gewinne. Die Aufträge mit den höchsten Opportunitätskosten werden von den vorhandenen Fahrzeugen befördert.

Ein etwas komplizierteres Problem entsteht, wenn man die Folgen der Entscheidungen in der ersten Periode für die Ausgangssituation in der zweiten Periode berücksichtigt. Je Station sind wieder 2 Ausgangssituationen denkbar. Stehen in einer Station mehr Fahr-

1) vgl. Minas, J. G., Mitten, L. G., The Hub Operation Scheduling Problem, in: Operations Research 6 (1958), S. 329 - 345.

zeuge abfahrtsbereit, als für die Erfüllung der vorliegenden Aufträge notwendig sind, kann es günstig sein, Leerfahrten in die Versandorte der zweiten Periode zu planen, damit in der zweiten Periode möglichst wenig Opportunitätskosten für nicht beförderte Aufträge entstehen. Sind dagegen zu wenig Fahrzeuge vorhanden, sind bei der Festlegung der Rangfolge der zu befördernden Aufträge auch die Folgen einer Nutzfahrt einzubeziehen, denn durch eine Nutzfahrt in eine Außenstation wird für die nächste Periode ein Fahrzeug für eine Fahrt zur Zentralstation bereitgestellt; eine Nutzfahrt zur Zentralstation vermehrt die zukünftigen Fahrtmöglichkeiten in die Außenstationen.

Bei der für die Festlegung der Rangfolge erforderlichen Bewertung der Aufträge sind also, neben den Opportunitätskosten der Aufträge der gegenwärtigen Periode, auch die Opportunitätskosten der Aufträge der zukünftigen Periode zu berücksichtigen. Nutzfahrten und Leerfahrten sind die Entscheidungsvariablen, die, unter Berücksichtigung der Folgen in der nächsten Periode, zu bewerten sind. Sie sind so festzulegen, daß die Summe aus Leerfahrtaufwendungen, Opportunitätskosten der gegenwärtigen und der zukünftigen Periode minimiert wird.¹⁾ Statt nur eine Fahrt je Fahrzeug wird durch die Art der Bewertung also eine Kombination zweier Fahrten erfaßt.

Da nur jeweils eine Folgefahrt zu berücksichtigen ist und das sternförmige Netz eine einfache Modellstruktur bedingt, läßt sich ein relativ einfaches, speziell für das dargestellte Problem entwickeltes Lösungsverfahren anwenden.²⁾

1) Minas, J.C., Mitten, L.G., a.a.O., S. 337;

2) vgl. Minas, J.C., Mitten, L.G., a.a.O., S. 338 ff.

R. F. Miller formuliert ein wesentlich komplexeres Fahrplanungsmodell für einen Verkehrsbetrieb, der innerhalb eines Netzes Aufträge mit Lastkraftwagen zu erfüllen hat.¹⁾ Das Netz aus Stationen und Strecken kann eine beliebige Form annehmen. Wie in dem von Charnes und M.H. Miller dargestellten Fahrplanungsmodell eines Eisenbahnbetriebes begrenzt die Arbeitszeit des Fahrpersonals die Zahl der in einer Planungsperiode anzufahrenden Stationen. Jede innerhalb der Arbeitszeit mögliche Folge von Stationen stellt eine Route dar. Die erste und letzte Station einer Route brauchen jedoch nicht identisch zu sein.

Wie im zuvor dargestellten Modell von Minas und Mitten und anders als in dem Fahrplanungsmodell eines Eisenbahnbetriebes von Charnes und M.H. Miller steht in jeder Station nur eine begrenzte Anzahl von Fahrzeugen bereit. Abweichend von den bisher dargestellten Modellen ist auch der Fahrzeugbestand je Station am Ende der Planungsperiode festgelegt. Dieser Fahrzeugbestand wird nicht wie in dem Modell von Minas und Mitten anhand der in der nächsten Periode erwarteten Aufträge bestimmt, sondern zunächst einfach als Datum vorgegeben.

Den Beförderungsmöglichkeiten durch Routenbefahrungen stehen Aufträge von je einer Fahrzeugladung gegenüber. Jeder Auftrag ist durch jeweils benachbarte Versand- und Bestimmungsstationen gekennzeichnet. Eine Station kann zugleich Versand- und Bestimmungsstation verschiedener Aufträge sein.

1) vgl. Miller, R. F., An Analysis of a Motor Freight Scheduling Problem, Diss. Ohio State University, Columbus (Ohio) 1962.

Das soeben dargestellte Problem läßt sich als Zuordnungsmodell formulieren. Die Routen sind dabei die Prozesse, die den Routen zugeordneten Fahrzeuge bestimmen die Prozeßniveaus. Als Nebenbedingungen sind die Aufträge zu erfüllen und die vorgegebenen Fahrzeugbestände in den Stationen zu Beginn und Ende der Planungsperiode einzuhalten.

Die Verknüpfung der Einzelfahrten ist durch die Bestimmung der innerhalb der Arbeitszeit des Fahrpersonals möglichen Routen bereits außerhalb des Zuordnungsproblems gelöst worden. Der Aufwand durch die Routenbefahrungen ist unter Beachtung der Nebenbedingungen zu minimieren.

Das Modell führt nicht zu ganzzahligen Lösungen, in der Lösung erscheinen also unvollständige Fahrten. Es ist ferner nur sinnvoll, wenn alle Aufträge erfüllt werden können. Sobald eine Auswahl unter den Aufträgen zu treffen ist, genügt das Ziel der Aufwandsminimierung nicht mehr. Wie in dem Modell von Minas und Mitten müssen dann Erträge berücksichtigt werden oder die Aufträge müssen mit entgangenem Gewinn bzw. Opportunitätskosten bewertet werden.

Das Zuordnungsmodell ist also nicht vollständig isomorph mit dem beschriebenen Fahrplanungsproblem. R.F.Miller entwickelt aus diesem Grund ein kombinatorisches Modell, das mehr Isomorphie zum Fahrplanungsproblem aufweist. Er fragt zunächst nach den notwendigen und hinreichenden Bedingungen, die sicherstellen, daß eine gegebene Auftragsstruktur durch Fahrzeugfahrten erfüllt werden kann.¹⁾

1) vgl. Miller, R.F., a.a.O., S. 15.

Bedingungen sind die Fahrzeugbestände in den einzelnen Stationen zu Beginn und Ende der Planungsperiode. Von den Fahrzeugbeständen ist es abhängig, ob die Aufträge erfüllt werden können, denn die möglichen Fahrzeugfahrten werden von den Fahrzeugbeständen begrenzt. Der Zusammenhang zwischen Bedingungen und Fahrzeugfahrten kann durch ein System von Gleichungen, die teilweise linear voneinander abhängen, ausgedrückt werden. In den Gleichungen stellen die Konstanten die Fahrzeugbestände, die Variablen die Fahrzeugfahrten dar.

Da ein System mit linear voneinander abhängigen Gleichungen redundant oder überinterpretiert ist, kann es zu einem äquivalenten System, das die gleichen Lösungen hat, umgeformt werden.¹⁾ Die Umformung ist mit Rücksicht auf das gestellte Problem vorzunehmen. Da nur ganzzahlige und nichtnegative Lösungen sinnvoll sind, wendet R. F. Miller bei der Umformung nur Rechenoperationen an, die ganzzahlige, nichtnegative Lösungen garantieren.²⁾ Als Ergebnis können schließlich obere oder untere Grenzen für den Bestand an fahrbereiten Fahrzeugen in den Anfangs- und Endstationen angegeben werden. Liegen die tatsächlich vorhandenen und gewünschten Fahrzeugbestände am Anfang und Ende der Periode innerhalb dieser Grenzen, ist ein Fahrplan möglich, der alle Aufträge erfüllt.³⁾

1) vgl. Dantzig, G. B., a.a.O., S. 80 ff.

2) vgl. Miller, R. F., a.a.O., S. 16 ff.

3) vgl. Miller, R. F., a.a.O., S. 21 f.

Ohne gleich eine optimale Lösung zu suchen, kann also zunächst überprüft werden, ob unter den gegebenen Bedingungen die vollständige Erfüllung aller Aufträge möglich ist. Ist sie möglich, kann in einem nächsten Schritt die Menge aller zulässigen Alternativen bestimmt werden. Sind es nur wenige Alternativen, ist eine Bewertung und Auswahl durch vollständige Enumeration möglich. Bei sehr vielen Alternativen muß nach vereinfachenden Lösungsverfahren gesucht oder auf exakte Lösungen verzichtet werden.

Ergibt der Zulässigkeitstest dagegen, daß es unter den bestehenden Bedingungen nicht möglich ist, alle Aufträge zu erfüllen, muß die Fragestellung umformuliert werden. Gesucht werden nunmehr die bisher als Daten betrachteten Größen, die in dieser Problemformulierung zu Variablen, die zu bewerten und auszuwählen sind, werden. Entscheidungsvariable sind also nicht mehr nur Art und Zahl der Routenfahrten, sondern zusätzlich die möglichen Änderungen in der Zahl der Aufträge, der Fahrzeuganfangs- und -endbestände. Um optimale Entscheidungen treffen zu können, müssen die Auswirkungen dieser Änderungen auf die Zielfgröße erfaßbar sein, die Änderungen müssen also bewertet werden können.

Eine generell gültige Bewertung läßt sich nicht ermitteln. Die Gewinneinbuße durch den Verlust eines Auftrags ist je Auftrag verschieden, vor allem, wenn man an die bei jedem Kunden verschiedenen Auswirkungen auf die künftige Auftragserteilung denkt. Ferner erfordert die vermehrte Bereitstellung eines Fahrzeugs zugleich die vermehrte Bereitstellung eines Fahrers, die mit unterschiedlichen Aufwendungen verbunden ist, je nachdem, um welchen Auswärtigenort es sich handelt, wie groß der Fahrerbestand dort und an anderen Orten ist. Nutzt man umgekehrt den

Bestand an Fahrern nicht zu Fahrten aus, kann dies sowohl zu verminderten als auch zu vermehrten Aufwendungen führen, je nachdem, ob die Fahrer in dem fraglichen Ort beheimatet sind oder nicht. Führt eine zusätzliche Fahrt in den Heimatort des Fahrers, können sich durch die Fahrt evtl. Personalaufwandsminderungen ergeben, eine Fahrt vom Heimatort fort führt dagegen meist zu vermehrten Personalaufwendungen.

Änderungen der Fahrzeugbestände am Anfang oder Ende der Planungsperiode lassen sich streng genommen nur beurteilen, wenn die Auswirkungen dieser Änderungen auf andere Variable der gleichen Periode und folgender Perioden bekannt sind. Soll beispielsweise ein Fahrzeugendbestand in einem Ort vermindert werden, müssen in diesem Ort weniger Fahrten enden. Die dadurch freiwerdenden Fahrzeuge können für andere Fahrten in andere Orte benutzt werden, so daß sich dort die Fahrzeugendbestände erhöhen. Ist dies durch mehrere Routenfahrten möglich, sind sämtliche betroffenen Alternativen zu bewerten, um die geringste Aufwands-erhöhung oder auch größte Aufwandsminderung durch die Änderung des einen Endbestandes herauszufinden.

Es zeigt sich, daß im Grunde sämtliche Änderungsalternativen des gesamten Systems zugleich berücksichtigt werden müssen, also ein umfangreiches kombinatorisches Problem vorliegt. Miller gibt selbst für sein kleines Beispiel mit vier Stationen keine Lösung an. Er begnügt sich damit, darauf hinzuweisen, daß sich die für den Fall erfüllbarer Aufträge entwickelten Gedankengänge theoretisch auch auf das komplizierte allgemeine Problem anwenden ließen.¹⁾

1) vgl. Miller, R. F., a.a.O., S. 55.

Im übrigen beabsichtigt Miller nicht die Entwicklung eines in der Praxis anwendbaren, effizienten Lösungsalgorithmus. Er versteht sein Modell mehr als Erklärungsmodell, das einen Einblick in die Problemstruktur gewähren soll.¹⁾

- 3) Aus dem travelling salesman-Problem entwickelte kombinatorische Fahrplanungsmodelle
- a) Begrenzte Isomorphie des travelling salesman-Problems zum Fahrplanungsproblem

Beim travelling salesman Problem²⁾ ist eine input-Einheit nacheinander n Prozessen einmal und nur einmal zuzuordnen. Der am Anfang bestimmte Ausgangsprozess erhält die letzte Zuordnung. Das Problem läßt sich auch umgekehrt formulieren: einem Prozeß sind nacheinander n input-Einheiten jeweils einmal und nur einmal zuzuordnen, darauf ist wieder mit der ersten input-Einheit zu beginnen. Der Erfolg einer Zu-

-
- 1) vgl. Miller, R.F., a.a.O., S. 63 "In the view of the writer, the principal merit of this approach is its contribution to the understanding of the structure of a particular problem."
 - 2) vgl. Belmore, M., Nemhauser, G.L., The Travelling Salesman Problem: A Survey, in: Operations Research 16 (1968), S. 538 - 558.
Churchman, Ackoff, Arnoff, a.a.O., S. 428 ff.
Flood, M., The Travelling Salesman Problem, in: Operations Research 4 (1956), S. 61 ff,
Hellmich, K., Die Reiseroute von kürzester Weglänge (Dauer), in: Mathematik/Technik/Wirtschaft 7 (1960), S. 166-175.
Kern, Ablauforganisation, a.a.O., S. 128 ff.,
Little, J.D.C., Murty, K.G., Sweeney, D.W., Karel, C., a.a.O., S. 973 - 989.
Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 264 ff.
Vokuhl, R., a.a.O., S. 142 ff.

ordnung hängt von der vorhergehenden ab. Wegen dieser Zusammenhänge ist der Gesamterfolg von der Reihenfolge der Zuordnungen abhängig.

Das Problem läßt sich anschaulich als die Rundreise eines Vertreters darstellen, der von einer Ausgangsstadt aus durch mehrere Städte zurück zur Ausgangsstadt reisen muß. Als Erfolgsgrößen können die insgesamt zurückgelegte Entfernung oder die Reisedauer, die beide von der Reihenfolge der Besuche abhängen, angesehen werden. Da die Besuchsreihenfolge den Gesamterfolg determiniert, müssen alle alternativen Reihenfolgen bewertet und miteinander verglichen werden, um die optimale Alternative herauszufinden. Es gibt $(n-1)!$ zu bewertende und zu vergleichende Reihenfolgen, falls man keine einschränkenden Annahmen über den Wert von Zuordnungen macht. Ist beispielsweise der Aufwand unabhängig von der befahrenen Richtung zwischen zwei Orten, reduziert sich der Umfang des Problems auf $(n-1)!/2$. Diese Symmetrieannahme ist jedoch nicht für alle Lösungsverfahren günstig.

In der Literatur zur Unternehmensforschung¹⁾ finden sich zahlreiche Versuche, in diesem einfach zu formulierenden, aber anscheinend nur durch totale Enumeration exakt lösbaren Problem, eine besondere Struktur zu entdecken, die die Zahl der explizit zu erfassenden Alternativen verringert. Durch Anwendung der dynamischen Programmierung, des Branch and Bound oder der ganzzahligen Programmierung ist es gelungen, für kleinere bis mittlere Probleme eine exakte Lösung mit angemessenem Zeitaufwand zu erreichen. Belmore und Nemhauser geben eine Übersicht über die bisher erreichten Ergebnisse.²⁾ Von Shapiro wurde

1) vgl. dazu vor allem den Überblick, den Belmore und Nemhauser geben. Belmore und Nemhauser, a.a.O., S. 539 - 543;

2) vgl. Belmore und Nemhauser, a.a.O., S. 555. .

das bisher größte Problem mit 70 Städten auf einer IBM 1620 in 103,5 Minuten mithilfe des Branch and Bound exakt gelöst.¹⁾ Dabei ist zu beachten, daß die Rechenzeit stark vom gewählten Beispiel und dem Computer abhängig ist.²⁾ Für größere oder ungünstig strukturierte Probleme stehen außerdem eine Reihe von Näherungsverfahren zur Verfügung.³⁾

Das travelling salesman-Problem ist so formuliert, daß damit die Bewegungen eines realen Gegenstandes erfaßt werden können. Ein Ankunftsort ist zugleich der Abgangsort für den nächsten Schritt. Es können also keine physikalisch unmöglichen Verknüpfungen auftreten. Statt eines Vertreters ist ebensogut ein Fahrzeug denkbar, das eine Anzahl von Orten von einem Ausgangsort zu bedienen hat. In diesem Sinne lassen sich einige Fahrplanungsprobleme als travelling salesman-Probleme deuten.⁴⁾ Es zeigen sich jedoch eine

-
- 1) vgl. Shapiro, D., Algorithms for the Solution of the Optimal Cost Travelling Salesman Problem, Diss. Washington University, St. Louis 1966, zitiert nach Belmore und Nemhauser, a.a.O., S. 555.
 - 2) vgl. Belmore und Nemhauser, a.a.O., S. 554. Beim Branch and Bound kommt es darauf an, wie schnell es im Einzelfall gelingt, Gruppen von zulässigen Lösungen, die nicht die optimale Lösung enthalten, von der weiteren Untersuchung auszuschließen. Belmore und Nemhauser schätzen, daß eine IBM 7090 50 - 300 mal schneller als eine IBM 1620 rechnet.
 - 3) vgl. Belmore und Nemhauser, a.a.O., S. 550 f. und S. 556.
 - 4) vgl. z.B. Eichenberger, H., Ökonomische Methoden in der linearen Planung, Berlin 1963, S. 25.

Reihe von Verschiedenheiten, die die unveränderte Anwendung der für das travelling salesman-Problem entwickelten Verfahren nicht ratsam erscheinen lassen.¹⁾

Während ein Vertreter auf seiner Rundreise lediglich berät oder Verkaufsgespräche führt, sind von einem Fahrzeug Objekte mitzuführen, die vorher aufgenommen wurden oder die noch abzuliefern sind. Diese Tatsache macht die Einbeziehung der Kapazität des Fahrzeuges in das Problem erforderlich. Die Fortsetzung der Rundreise eines Fahrzeuges wird sinnlos, wenn es bereits ausgelastet ist und die in den folgenden Orten zur Beförderung vorgesehenen Mengen nicht mehr aufnehmen kann, oder wenn umgekehrt ein Fahrzeug bereits leer ist und den Bedarf an den Ankunftsorten nicht erfüllen kann. In diesen Fällen begrenzt die Kapazität des Fahrzeuges die Länge der Rundreise oder determiniert die anzufahrenden Orte unter dem Gesichtspunkt der unterschiedlichen, dort abzuliefernden oder aufzunehmenden Nachfragemengen.

Wird Ladung auf einer Rundreise sowohl ausgeliefert als auch aufgenommen, schließen sich immer wieder neue travelling salesman-Probleme für die Auslieferung und Aufnahme von Objekten an, denn zugleich mit der Durchführung einer Aufnahme- und Auslieferungsrundreise werden durch die geplante Aufnahme und Auslieferung von Objekten neue Rundreiseprobleme definiert.²⁾

-
- 1) vgl. zu den folgenden Ausführungen auch: Clark, G., Wright, J.W., Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, in: Operations Research 12 (1964) S. 568 - 581; Dantzig, G.B., Ramser, J.A., The Truck Dispatching Problem, in: Management Science 6 (1959) S.80-91; Pierce, J.F., a.a.O., S. 4 ff.
- 2) vgl. Bendixen, a.a.O., Fußn. S. 213, Bendixen führt als Beispiel die Rundreise eines Seeschiffes an.

Weitere Modifikationen des travelling salesman-Problems werden erforderlich, wenn es sich nicht mehr um ein Fahrzeug, sondern um mehrere Fahrzeuge handelt, die von einem Ausgangsort aus Rundreisen, die sich gegenseitig ergänzen, beginnen. In diesem Fall müssen sämtliche möglichen Kundreisen aufeinander abgestimmt werden.

Wieder eine andere Problemstruktur liegt dann vor, wenn mehrere Ausgangsorte gegeben sind, die Anzahl der von jedem Ausgangsort anzufahrenden Orte jedoch erst im Laufe der Problemlösungen zu ermitteln sind, da sich die Rundfahrten gegenseitig ergänzen können.

Vollständig vom travelling salesman-Problem weg führt schließlich die Konstellation, in der keine festen Ausgangsorte mehr gegeben sind und ein Wechsel der Fahrzeuge zwischen den verschiedenen Ausgangsorten erlaubt ist.

Der Vergleich zwischen der Struktur des travelling salesman-Problems und der des Fahrplanungsproblems zeigt das Ausmaß der Prämissen, die in Fahrplanungsmodellen gesetzt werden müßten, um die Anwendung der Verfahren des travelling salesman-Problems ohne weiteres zu ermöglichen. Umgekehrt wird damit deutlich, welchen Modifikationen das travelling salesman-Problem unterworfen werden müßte, damit es mit Fahrplanungsproblemen übereinstimmt.

b) Erweitertes travelling salesman-Problem als Grundlage für Fahrplanungsmodelle

11) Modelle ohne Zeitgrenzen für die Aufträge

Eine Abwandlung des travelling salesman-Problems ist die Grundlage für einige in der englischsprachigen Literatur diskutierte Fahrplanungsmodelle. In der amerikanischen Literatur wird diese Abwandlung anschaulich "farmer's daughter"-Problem¹⁾ oder "clover leave"-Problem²⁾ genannt.

Der Handelsreisende unterbricht seine Rundreise jeweils nach einer Anzahl von Orten, um die Tochter eines Farmers, die im Ausgangsort der Rundreise wohnt, zu besuchen. Die zum Besuch aller Orte befahrene Gesamtroute läßt sich graphisch als eine Art Kleeblatt darstellen, dessen Blattumrandungen durch die Teilrouten vom und zum Ausgangsort gezeichnet werden. Eine "Blattumrandung" wird sich in einer optimalen Lösung nicht selber schneiden, die "Blätter" können sich jedoch teilweise überdecken. Anzahl und ggf. auch Reihenfolge der Teilrouten sowie die Reihenfolge der Orte innerhalb der Teilrouten sind gemäß den jeweils relevanten Zielen und Nebenbedingungen festzulegen. Die Lösung liegt zwischen zwei Extremfällen: Verbindung jedes einzelnen anzufahrenden Ortes mit dem zentralen Ort oder Verbindung aller außenliegender Orte in einer einzigen Rundfahrt mit nur einer Hin- und Rückfahrt zum zentralen Ort gemäß dem reinen travelling salesman-Problem.

-
- 1) Gavin, W.W., Crandall, H.W., John, I.B., Spellman, R.A., Applications of linear Programming in the Oil Industry, in: Management Science 3 (1957), S. 407 - 439, hier S. 429.
2) vgl. Gavin, W.W., u.a., a.a.O., S. 429
Dantzig, G.B., Ramser, J.H., a.a.O., S. 80.

Die gleiche Problemstruktur tritt auf, wenn ein Fahrzeug von einem zentralen Ort aus eine Reihe von Orten zu beliefern hat, aber nicht alle Orte auf einer Rundreise beliefern kann, weil die begrenzte Aufnahmefähigkeit des Fahrzeuges es nicht erlaubt, für alle Orte die Ladung mitzunehmen. Das Fahrzeug muß deswegen zur erneuten Ladungsaufnahme in den zentralen Ort zurückkehren, um von dort die übrigen Orte zu beliefern. Zu diesem „truck dispatching“-Problem, das sich auf mehrere Fahrzeuge ausdehnen läßt, liegen einige Untersuchungen vor.¹⁾

Dantzig und Ramser definieren das folgende Modell:²⁾ Gesucht werden die geringsten kilometerabhängigen Aufwendungen für die Fahrten eines Lastkraftwagentyps mit einer Kapazität von C je Fahrzeug. Die Fahrzeuge müssen ein in bezug auf die Fahrzeugkapazität gleichartiges Gut von einem zentralen Ort P_0 zu den Orten P_i ($i=1,2 \dots n$) bringen. Die entfernungsabhängigen Aufwendungen d_{ij} und d_{ji} zwischen den Orten P_i und P_j ($i, j = 0,1,2, \dots n$) sind für beide Richtungen gleich groß. Die Auftragsgröße q_i je Ort P_i ist verschieden groß. Sie überschreitet für einen Auftrag nicht die Fahrzeugkapazität, die Summe der Aufträge ist jedoch größer als die Kapazität eines Fahrzeuges. Da ein Fahrzeug nicht alle Aufträge erfüllen kann, müssen mehrere Fahrzeuge von zentralem Ort aus eingesetzt werden oder ein Fahrzeug muß mehrmals eine Rundreise beginnen.

-
- 1) vgl. Dantzig, G.B., Ramser, J. M., a.a.O.;
Clarke, G., Wright, J. W., a.a.O.;
Gaskell, T. J., Bases for Vehicle Fleet Scheduling, in: Operational Research Quarterly 18 (1967), S. 281 - 290;
Pierce, J. F., a.a.O.;
2) vgl. Dantzig, G. B., Ramser, J. M., a.a.O., S.80 ff.

Die Gesamtlänge aller Teilrouten ergibt sich aus Anzahl und Länge je Teilroute. Die Anzahl der Teilrouten ist umso kleiner, je mehr die Kapazität eines Fahrzeuges ausgelastet wird. Für die Länge gilt diese Aussage nicht zwangsläufig, da die Reihenfolge unter dem Gesichtspunkt der Entfernungsminimierung, nicht der Auslastungsmaximierung, gewählt werden kann.

Auslastung der Fahrzeuge, Anzahl und Länge der Teilrouten hängen davon ab, welche Orte verknüpft werden. Man kann eine Entscheidungsvariable x_{ij} definieren, die bei Verknüpfung der Orte P_i und P_j gleich 1 gesetzt wird, anderenfalls gleich Null. Die zu minimierende Zielfunktion lautet dann:

$$D = \sum_{i,j=0}^n d_{ij} x_{ij}$$

Läßt man zu, daß die x_{ij} kontinuierliche Werte zwischen 0 und 1 annehmen, könnte man die Methode der linearen Programmierung anwenden.¹⁾ Ergänzend müßten noch Nebenbedingungen formuliert werden, die sicherstellen, daß jeder Ort angelaufen wird und die Kapazitätsgrenzen der Fahrzeuge beachtet werden. Selbst ein derart ergänztes Modell ergäbe jedoch unrealistische, nichtganzzahlige Lösungen, die nur Teilzuordnungen eines Fahrzeugs zu einer Teilstrecke repräsentieren würden. Das mit der linearen Programmierung erhaltene Ergebnis ist deswegen nur als Anhaltspunkt in der Form einer unteren Grenze brauchbar.

Um zu realisierbaren Lösungen zu kommen, müssen Methoden angewandt werden, die die Verknüpfung diskreter und ganzzahliger Werte erlauben. Dantzig und

1) vgl. Dantzig, G. B., Ramser, J. H., a.a.O., S. 83.

Ramser geben keine Methode an, die sowohl die totale Enumeration vermeidet als auch zwingend zu optimalen Ergebnissen führt. Sie beschränken sich auf die Darstellung eines Näherungsverfahrens.

In einem Näherungsverfahren kann entweder mehr Gewicht auf die Kapazitätsauslastung eines Fahrzeuges und damit auf die Minimierung der Anzahl der Teilrouten gelegt werden, oder es wird mehr darauf geachtet, daß die Länge je Teilroute minimiert wird. Das von Dantzig und Ramser angegebene Verfahren betont sehr stark die Maximierung der Kapazitätsauslastung und damit die Minimierung der Anzahl der Teilrouten.

Clarke und Wright formulieren das truck dispatching-Problem ähnlich wie Dantzig und Ramser.¹⁾ Sie geben aber ein Näherungsverfahren an, bei dem das Schergewicht nicht auf der Minimierung der Zahl der Teilrouten, sondern auf der Ermittlung möglichst kurzer Teilrouten liegt, selbst wenn die Fahrzeuge dadurch je Fahrt weniger ausgelastet sein sollten. Clarke und Wright weisen nach, daß dies Verfahren meist zu besseren Ergebnissen führt.²⁾ Ihre Lösungsmethode ermöglicht außerdem ohne Schwierigkeiten die Einbeziehung von Fahrzeuggruppen unterschiedlicher Kapazität. Die Anzahl der Fahrzeuge je Gruppe kann zusätzlich beschränkt sein.

Gaskell untersucht die Güte von Näherungsverfahren zur Lösung der truck dispatching-Probleme.³⁾ Er weist dabei auf die Abhängigkeit zwischen der Struk-

1) Clarke, G., Wright, J.W., a.a.O., S. 568 - 581

2) Clarke, G., Wright, J.W., a.a.O., S. 569, S. 75 f;

3) vgl. Gaskell, T.J., a.a.O.

tur der Beispiele und der Art des Näherungsverfahrens hin. Die Struktur der Beispiele kann durch die Verteilung der Orte P_i , die Streuung der Bedarfsmengen q_i , die Anzahl und Ladekapazität der Fahrzeuge sowie die maximal zulässige Länge einer Teilroute beschrieben werden. Die Näherungsverfahren unterscheiden sich durch Art und Reihenfolge der Teilschritte, in die die Problemlösung zur Vereinfachung zerlegt wird. Es zeigt sich, daß keines der Näherungsverfahren in jedem Fall zur besten Lösung führt.

In allen bisher diskutierten Problemstellungen des truck dispatching-Problems wird die Problemlösung nicht durch Zeitgrenzen beeinflusst. Das Schwergewicht liegt auf der Suche nach optimalen örtlichen Zuordnungen, die anschließend durch zeitliche Zuordnungen, die aber gemäß den Modellvoraussetzungen ohne Einfluß auf die Zielfunktion bleiben, ergänzt werden können.

22) Modelle mit Zeitgrenzen für die Aufträge

Probleme, in denen zeitliche Zuordnungen indirekt über zeitliche Nebenbedingungen auf den Wert der Zielfunktion einwirken, werden von Pierce behandelt.¹⁾ Pierce gibt zudem Lösungsverfahren an, die zu einer optimalen Lösung führen, falls sie entsprechend ausführlich angewandt werden. Diese Verfahren lassen sich auch bereits beim Erreichen einer befriedigenden Lösung abbrechen.²⁾ Im Teil 1 seiner Untersuchungen bestimmt Pierce die optimale oder befriedi-

1) vgl. Pierce, J.F., a.a.O.,

2) vgl. Pierce, J.F., a.a.O., S. 1 ff.

vgl. auch Balinski, M.L., Quand, R.E., On an Integer Program for a Delivery Problem, in: Operations Research 15 (1964), S. 303.

gende Gesamtroute eines Fahrzeugs. Im Teil 2, der bis jetzt noch nicht vorlag, ist die Behandlung von Problemen mit mehreren Fahrzeugen vorgesehen.¹⁾

Pierce kompliziert die Problemstellung stufenweise. Er beginnt mit dem reinen travelling salesman-Problem. Ein Fahrzeug hat von einem zentralen Ort aus eine Reihe von Orten zu beliefern, Restriktionen bestehen nicht. Ziel ist die Belieferung der Orte in der kürzesten Zeit. Zur Lösung wird das Branch and Bound-Verfahren angewandt. Die Alternativen werden also gruppenweise untersucht, untere Grenzen je Gruppe gesetzt und ganze Gruppen jeweils vom weiteren Lösungsvorgang ausgeschlossen.

Falls bei jedem Auftrag eine späteste Lieferzeit zu beachten ist, läßt sich das gleiche Verfahren fast unverändert anwenden. Da das zu minimierende Ziel der Zeitbedarf für die Gesamtroute ist, wird die Zeit beim Lösungsverfahren sowieso erfaßt. Beim Ausschließen von Lösungsgruppen aus der weiteren Untersuchung können zusätzlich zu den offensichtlich dominierten Alternativen auch die unzulässigen ausgeschlossen werden. Ähnlich lassen sich auch Grenzen für die frühestmöglichen Lieferzeiten von Aufträgen berücksichtigen.²⁾

Sobald die Kapazität des Fahrzeuges begrenzt ist, muß die Gesamtroute in nacheinander zu befahrende Teilrouten, die jedesmal wieder zum Ausgangsort zurückführen, zerlegt werden. Liegen keine Zeitgrenzen vor, ist es offensichtlich gleichgültig, in welcher

1) vgl. Pierce, J.F., a.a.O., S. 17 f.

2) vgl. Pierce, J.F., a.a.O., S. 44 ff.

Reihenfolge die Teilrouten von dem einen Fahrzeug befahren werden,¹⁾ während die Reihenfolge innerhalb einer Teilroute weiterhin den Zeitbedarf bestimmt. Die vorher bereits angewandten Methoden des Branch and Bound können mit einigen Modifikationen auch in diesen Fällen benutzt werden. Sobald zusätzlich noch Zeitgrenzen der Aufträge zu berücksichtigen sind, ist die Reihenfolge der Teilrouten jedoch nicht mehr gleichgültig. Die mehrfachen Nebenbedingungen begrenzter Fahrzeugkapazität, spätest- und frühestmöglicher Lieferzeit komplizieren das Problem nunmehr erheblich, denn Zusammensetzung und Reihenfolge der Teilrouten müssen gleichzeitig festgelegt werden.

Für das Fahrzeug lassen sich weitere Beschränkungen angeben. So können gleichzeitig Grenzen der Aufnahmefähigkeit in Volumenmaßen und Gewichtsmaßen angegeben sein, und außerdem kann aus anderweitigen Gründen die Anzahl der je Teilroute anzufahrenden Orte einer Begrenzung unterliegen. Pierce gibt auch für diese Probleme zumindest theoretisch mögliche Lösungswege an.²⁾

Die Rechenzeit zur Lösung von travelling salesman-Problemen mit Nebenbedingung ist nur dann sehr viel größer als für unbegrenzte Probleme, wenn durch die Nebenbedingung viel Spielraum für die Wahl von Alternativen bleibt. Bei stark einengenden Nebenbedingungen erhöht sich die Rechenzeit nicht so stark.³⁾

1) vgl. Pierce, J.F., a.a.O., S. 52

2) ders., a.a.O., S. 47 ff.

3) ders., a.a.O., S. 42 ff.

Abschließend werden von Pierce noch Fälle diskutiert, in denen zu entscheiden ist, ob ein Ort überhaupt angefahren wird.¹⁾ Als Entscheidungsgrundlage für die Wahl der Orte müssen neben den Aufwendungen für die Fahrten auch Erträge aus der Auftragserfüllung in diesen Orten berücksichtigt werden. Eine ähnliche Problemstruktur liegt vor, wenn Aufträge auch teilweise erfüllt werden dürfen. Entsprechend den erlaubten Teilmengen können die Orte dann in Scheinorte aufgespalten werden. Der Scheinort mit der Mindestmenge ist in jedem Falle anzufahren, die Wahl der anderen Scheinorte bzw. das Ausmaß der Auftragserfüllung ist ein Entscheidungsproblem, das im Rahmen der Gesamtlösung zu beurteilen ist. Solange es sich um diskrete Auftragsteile handelt, ist auch dies Problem mit dem von Pierce angegebenen Methoden prinzipiell lösbar.

Pierce stellt also auf der Grundlage des travelling salesman-Problems ein weitgehend mit dem Fahrplanungsproblem isomorphes Modell auf. Er berücksichtigt vor allem zeitliche Grenzen für die Auftragserfüllung und die begrenzte Aufnahmefähigkeit des Fahrzeugs. Zudem gelingt es ihm, die kombinatorische Problemstruktur mit der Methode des Branch and Bound zu erfassen und einen Weg zur exakten Problemlösung anzugeben.

Allerdings muß man sich auch die Grenzen seines Lösungsansatzes vor Augen halten. Einmal wächst der Rechenaufwand bei größeren, realitätsnahen Modellen so schnell an, daß man den Lösungsalgorithmus bereits abbrechen muß, bevor die optimale Lösung erreicht ist.

1) vgl. Pierce, J. F., a.a.O., S. 81 ff.

Zum anderen wird letztlich mit allen Modellen auf der Grundlage des travelling salesman-Problems nur ein recht spezielles Problem gelöst. Meist handelt es sich nur um 1 Fahrzeug, das eine Rundfahrt in dem gleichen Ort beginnen und beenden muß.

III. Fahrplanungsprobleme in der Form von Simulationsmodellen

1) Kennzeichnung der Struktur von Simulationsmodellen

Bei Simulationsmodellen¹⁾ geht es weniger um die Auswahl der optimalen Alternative aus sämtlichen möglichen Alternativen, es werden lediglich einige Alternativen herausgegriffen und ihre Auswirkungen auf die Zielgröße verfolgt. Ähnliche oder gleiche Gesichtspunkte werden beim sogenannten Operational Gaming oder Operational Experimentation²⁾ angewandt.

Die Simulation wird häufig dann benutzt, wenn unsichere Umweltdaten, die das Modell durch die Vielzahl möglicher Ausprägungen einer Einflußgröße komplizieren,

1) vgl. Churchman, Ackoff, Arnoff, a.a.O., S. 371 ff.
Harling, J., Simulation Techniques in Operations Research - A Review, in: Operations Research 6 (1958) S. 307 - 319;
Koller, H., Simulation als Methode in der Betriebswirtschaft, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 36. Jahrgang (1966) S. 95 ff.
Malcolm, D.G., Bibliographie on the Use of Simulation in Management Analysis, in: Operations Research 8 (1960) S. 169 ff.
Sasieni, Yaspan, Friedman, a.a.O., S. 134- 163 ff.

2) vgl. Churchman, Ackoff, Arnoff, a.a.O., S.425 und 431;

vorliegen. Die Unsicherheit wird durch Eingabe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder durch die Erzeugung von Zufallszahlen berücksichtigt. Wegen dieser Art der Berücksichtigung der Unsicherheit wird die Bezeichnung Monte Carlo-Methode zuweilen synonym für die Simulation gebraucht.¹⁾ Da Simulationsmodelle jedoch auch auf deterministischen Daten aufgebaut werden können, empfiehlt sich diese Gleichsetzung der Begriffe nicht.²⁾

häufig wird in Simulationsmodellen nach Investitionsalternativen, die von Abläufen abhängig sind, gefragt. Jede Investitionsalternative wird mit zahlreichen Ablaufalternativen auf ihre Auswirkungen im Gesamtmodell untersucht.³⁾

Statt Investitionsalternativen können auch Ablaufregeln untersucht werden.⁴⁾ Bei konstanten Investitionsdaten werden nur die Auswirkungen der Ablaufregeln auf die Zielgröße getestet. Unter der Annahme sicherer Daten ist mit jedem Modelldurchlauf eine Ablaufregel erfaßbar. Bei unsicheren Daten müßten je Ablaufregel zahlreiche Modelldurchläufe durchgeführt werden, um einen wahrscheinlichen Zielgrößenswert ermitteln zu können.

Den traditionellen Methoden der Fahrplanaufstellung liegen ebenfalls bestimmte Ablaufregeln zugrunde, die bei der Planaufstellung verfolgt werden. Gelingt es, diese Zusammenhänge in einem Simulationsmodell abzubilden und das Modell für einen Computer zu programmieren, so kann der Fahrplan nun mit einem Mo-

1) vgl. Lunsberg, H., a.a.O., S. 143.

2) vgl. Kern, Operations Research, a.a.O., S. 60.

3) vgl. Barling, J., a.a.O., S. 315.

4) vgl. Barling, J., a.a.O., S. 315.

delldurchlauf in einem Bruchteil der sonst benötigten Zeit aufgestellt werden. Der Hauptvorteil des Simulationsmodells gegenüber traditionellen Methoden liegt jedoch darin begründet, daß der schnelle Modelldurchlauf es erlaubt, mehrere Ablaufregeln zu testen und die beste auszuwählen.

2) Beispiel für die Simulation eines Fahrplanungsproblems

a) Darstellung des Beispiels

Beispiele für die Simulation von Fahrplanungsproblemen finden sich für fast alle Verkehrszweige.¹⁾ Um die Anwendungsmöglichkeiten der Simulation für Fahrplanungsprobleme zu verdeutlichen, soll ein besonders

1) vgl. Allman, W.P., Modèle de simulation à la calculatrice de système de transport de marchandises par chemin de fer, in: Bulletin Mensuel de l'Association internationale du Congrès des Chemins de Fer 4 (1967), S. 44 - 57;
Boss, J.P., Simulation des Verkehrs auf einer Autobuslinie, in: Ablauf- und Planungsforschung 2 (1961), S. 20 - 23;
Mac Donald - Taylor, R., Scheduling in a Transportation Network, in: Operations Research 16 (1968), Suppl. 1, S. B-91 (Kurzfassung);
Freudmann, E., Simulation of a Liquid Container Distribution System, in: Operations Research 16 (1968), Suppl. 1, S. B-88 (Kurzfassung);
Olson, G.A., Sorensen, E.E., Sullivan, W.J., Medium Range Scheduling Model for a Freight Fleet, Matson Research Corporation San Francisco (Cal.) 1967 (unveröffentlichtes Manuskript);
O'Brien, G.G., Crane, R.R., The Scheduling of a Barge Line, in: Operations Research 7 (1959), S. 561 - 570;
Wanger, M.L., Rose, E., Weber, A.L., Simulation of a Maritime Shipping System, in: Operations Research 16 (1968), Suppl. 1, S. B-90 (Kurzfassung).

typisches Simulationsmodell beschrieben werden.¹⁾
Dieses Modell wurde bereits für die Planung einer amerikanischen Schifffahrtsgesellschaft eingesetzt.

Die Schifffahrtsgesellschaft verkehrt mit 12 Schiffen zwischen Hawaii und drei Bereichen (Seattle, San Francisco, Los Angeles) an der Westküste der USA. Die westwärts Richtung Hawaii und die ostwärts Richtung Westküste zu befördernden Güter lassen sich in zwölf Klassen einteilen. Die Beförderungsleistungen werden im Zeitablauf in unterschiedlicher Stärke nachgefragt. Es sind vier Schiffstypen zu unterscheiden, die unterschiedliche Reisegeschwindigkeiten, Aufwendungen je Seemeile und eine unterschiedliche quantitative und qualitative Aufnahmefähigkeit für Objekte aufweisen. Die Fahrtzeiten und Bestimmungshäfen der Schiffe sind so festzulegen, daß jeweils das richtige Schiff zum richtigen Zeitpunkt im richtigen Hafen ankommt oder abfährt. Die Schiffe sind richtig eingeplant, wenn die Häfen in einer festgelegten Zeitspanne mindestens einmal angefahren werden und ein möglichst großer Gewinn erzielt wird. Die Planungsperiode soll 90 Tage umfassen.

Die Ergebnisse der Planung lassen sich kurz vor der Durchführung in begrenztem Umfang korrigieren und detaillieren, was jedoch nach den Modellvoraussetzungen ohne wesentlichen Einfluß auf den Gewinn bleibt. Der 90-Tage-Plan wurde von der Gesellschaft bisher mit traditionellen Planungsmethoden aufgestellt und soll nun mit einem Simulationsmodell ermittelt werden.

Entscheidungsvariable sind die Zeit-Ort-Zuordnungen jedes einzelnen Schiffes. Ein Schiff kann nach Hawaii fahren, vor der Hawaii-Fahrt einen zweiten Westküsten-

1) vgl. Olson, C.A., Sorensen, E.E., Sullivan, W.J., a.a.O.

bereich anlaufen, wegen zu geringer Ladung stillgelegt werden oder für die nach einer festen Zeitspanne für jedes Schiff fällige Werftüberholung ins Trockendock geschickt werden. Bei der Festlegung der Entscheidungsvariablen sind eine Reihe von Daten und das Ziel zu beachten.

Die Nachfrage ist nach Art, Abgangshafen und Zeitpunkt der Entstehung strukturiert. Der Bestimmungshafen kann im Modell entfallen, da für westwärts gehende Ladung nur Hawaii in Frage kommt und die ostwärts zur Westküste gehenden Fahrten vom Ausmaß der Rückladung für Hawaii bestimmt werden. Diese letzte Regel ist insofern sinnvoll, als die Nachfrage von Hawaii aus im allgemeinen wesentlich geringer ist und ohne Schwierigkeiten erfüllt werden kann. Die Angabe eines spätestmöglichen Beförderungszeitpunktes erübrigt sich, da die Nachfrage während der Planungsperiode nach den Modellannahmen bestehen bleibt. Diese Annahme ist berechtigt, da keine wesentliche Konkurrenz besteht, zu der die Nachfrage abwandern könnte. Zudem kann der zeitliche Mindestabstand der Hafenbedienungsabfolge so gelegt werden, daß Abwanderungen vermieden werden. Für jeden Bereich der Westküste ist die Nachfragestruktur für die ganze Planungsperiode in Tabellen gegeben. Für Hawaii wird der tägliche Nachfragezuwachs innerhalb des Modells simuliert.

Die 12 Güterklassen sind gemäß ihren Umschlagseigenschaften, der Art und dem Ausmaß des beanspruchten Schiffsraumes und der Höhe der Frachteinnahmen eingeteilt. Für jeden der vier Schiffstypen ist die Aufnahmefähigkeit für Objektart und Anzahl der Objekteinheiten angegeben. Objekteinheiten sind Container, Autos sowie Flüssigkeits-, Schüttgüter- und

Stückgütermaße. Je ein Schiffstyp ist für Container, für Autos oder für Flüssigkeiten speziell geeignet. Ein universeller Schiffstyp ist für alle Ladungsarten einschließlich der Schütt- und Stückgüter geeignet.

Die Kapazität der Häfen ist beschränkt. Die Kapazitätsgrenzen sind gesondert für die Verladeeinrichtungen der unterschiedlich zu behandelnden Ladungsarten angegeben. Im einzelnen müssen Kapazitätsangaben für Kräne, Förderanlagen und Sammelplätze gemacht werden, die die Fähigkeit zur Objektbehandlung wiedergeben. Aus diesen Angaben lassen sich für jeden Zeitabschnitt Verzögerungszeiten in Abhängigkeit von Zahl und Auslastung der innerhalb des Zeitabschnitts löschenden oder ladenden Schiffe ableiten. Für Laden und Löschen sind also je nach Hafen und dessen Auslastung sowie entsprechend der Art und Größe der Schiffsladung die durchschnittlichen Liegezeiten je Schiff und Zeitabschnitt errechenbar.

Durch die Wahl der Bestimmungshäfen und der Abfahrtszeitpunkte je Schiff soll der maximale Gewinn innerhalb der Planungsperiode, unter Beachtung von Zielnebenbedingungen, erreicht werden. Zielnebenbedingungen sind die je Hafenbereich festgelegten maximalen Zeitabstände für die Bedienung dieser Häfen. Der Gewinn wird in Form verschiedener Deckungsbeiträge ermittelt und dient als Maßstab für die Festlegung der Entscheidungen. Eine der Grundlagen der Gewinnermittlung ist eine Tabelle der Deckungsbeiträge aus Frachteinnahmen und Umschlagsaufwand je Gutsklasse-Hafenkombination (Deckungsbeiträge I). Zusammen mit der Tabelle der Fahrtaufwendungen je Schiff und Richtung lassen sich daraus die Deckungsbeiträge je Fahrt, in Abhängigkeit von den beförderten Mengen der Gutstypen,

ermitteln (Deckungsbeiträge II). Der Deckungsbeitrag der gesamten Fahrplanungsperiode errechnet sich aus den Deckungsbeiträgen II abzüglich den Aufwendungen für stillgelegte Schiffe (Deckungsbeitrag III). Er ist die eigentlich zu maximierende Größe und muß letztlich sämtliche fahrplanungsunabhängige Aufwendungen des Verkehrsbetriebes decken bzw. möglichst übersteigen.

Dies Problem wurde in der Simulationssprache GPSS III¹⁾ für eine IBM 7094 programmiert und durch zwei Hilfsprogramme ergänzt. Für das Hauptprogramm waren 1.400 GPSS III-Anweisungen notwendig, die ein Drittel des internen Speicherplatzes der IBM 7094 beanspruchten (insgesamt 32.768 Wörter zu 32 bits). Die Eingabedaten beanspruchten ein Viertel des Speicherplatzes. Die einmalige Simulation einer 90-tägigen Planungsperiode mit Zeitschritten von einer Stunde dauerte 6 Minuten.

Der Modellablauf soll kurz angedeutet werden. Neben der Eingabe der Daten müssen zu Beginn der Schiffsstandort, der Bestimmungshafen und die Ladung jedes Schiffes eingegeben werden. Zunächst wird dann überprüft, ob nicht gleich zu Beginn der Periode ein Schiff stillzulegen ist oder zur Werftüberholung muß.

Die Schiffe, die für Hawaii bestimmt sind, werden vom Programmteil Hawaii übernommen. Als erstes wird die Restfahrt bis Hawaii bzw. der Zeitbedarf dafür simuliert. Ist eine Hafenanlage besetzt, wird das Schiff in eine Warteschlange eingeordnet, bis ein Löschrplatz frei ist, dann wird der Löschvorgang simuliert und der Zeitbedarf dafür fortgeschrieben.

1) vgl. General Purpose Systems Simulator III, Introduction, IBM Application Program, o.O., 1965.

Bevor ein weiterer Vorgang simuliert wird, muß nun vom Modell eine Entscheidung gefällt werden, zu welchem Hafenbereich der Westküste gefahren werden soll. Während der Wahlvorgänge zur Entscheidungsfindung ruht der simulierte Zeitablauf. Für die Entscheidung ist das von Hawaii ausgehende Ladungsaufkommen unmaßgeblich. Deswegen ist zunächst nur zu fragen, ob die festgelegte Bedienungshäufigkeit für einen Westküstenhafen eine Fahrt dorthin erfordert. Zu diesem Zweck wird die letzte Ankunftszeit aus vorgegangenen Fahrten mit der geschätzten Ankunftszeit für das zur Entscheidung anstehende Schiff verglichen. Wird die festgelegte Zeitgrenze überschritten, müssen für weitere Schiffe nun auch die geschätzten Ankunftszeiten berücksichtigt werden. Liegen sie später als die geschätzte Zeit für das zur Entscheidung anstehende Schiff, muß das fragliche Schiff den Hafen anlaufen. Erfordert die Zielnebenbedingung der Bedienungshäufigkeit keine Fahrt, wird der mögliche Gewinn einer Rückfahrt nach Hawaii (Deckungsbeitrag II) als Entscheidungskriterium herangezogen. Der Hafenbereich der Westküste, der zum ankunftszeitpunkt das Ladungsaufkommen mit den höchsten Gewinnaussichten haben wird, ist der zu wählende Zielhafen. Die entsprechende Ladung wird für dieses Schiff reserviert.

Für die in Hawaii für den Westküstenhafen bestimmte Ladung wird nach der Entscheidungsfixierung der Ladungsvorgang und der entsprechende Zeitablauf simuliert, und das Schiff zum Programmteil 'Westküste' überwiesen.

Im Programmteil 'Westküste' wird zunächst die je Schiff und Hafen erforderliche Fahrzeit zur Westküste und

anschließend die Löschzeit simuliert. Falls Hafenanlagen belegt sein sollten, muß das Schiff vor dem Löschen in eine Warteschlange eingeordnet werden.

Es sind nun wieder mehrere Entscheidungen möglich. Muß das Schiff gemäß den Eingabedaten innerhalb der nächsten 10 Tage zur Werftüberholung, so ist es in den Programmteil 'Werftüberholung' zu überführen, die Reparaturzeit ist zu simulieren. In den bisherigen Plänen sind in einem solchen Fall entsprechende Korrekturen an den Ladungsreservierungen vorzunehmen. Die Entscheidungen über die nicht reparaturbedürftigen Schiffe werden anhand der Zielfunktion festgelegt. Ist der Gewinn (Deckungsbeitrag II) geringer als eine festgesetzte Grenze, wird das Schiff so lange stillgelegt, bis das Ladungsaufkommen genügend Gewinn verspricht. Stilllegungen in Hawaii sind im Modell von vornherein nicht vorgesehen, wahrscheinlich weil dort die dafür erforderlichen Anlagen nicht ausreichen und das Fahrpersonal vorwiegend an der Westküste wohnt. Während der Stilllegung ist zu beachten, daß dadurch nicht die Bedingungen der Bedienungshäufigkeit verletzt werden. Ein zweiter Hafenbereich der Westküste wird dann angelaufen, wenn das Schiff freien Laderaum hat und die zusätzliche Ladung durch den Umweg einen höheren Deckungsbeitrag pro Tag (Deckungsbeitrag IV) verspricht als der direkte Weg.

Ist eine der Fahrtentscheidungen gefallen, werden die Zeiten für das Laden und für eine evtl. Fahrt zum zweiten Hafengebiet der Westküste simuliert und das Schiff dem Programmteil 'Hawaii' zugewiesen. Im Programmteil 'Hawaii' laufen dann erneut die bereits beschriebenen Simulations- und Testvorgänge ab.

Während des Modelllaufs werden alle gewünschten Ergebnisse gespeichert. Sie können geordnet nach Schiffen, Hafengebieten oder Ladungsarten als Schiffsfahrpläne oder Gewinnübersichten ausgegeben werden.

b) Kritische Würdigung

Ein einmaliger Modelldurchlauf simuliert Ablaufregeln, die auch bei einer Fahrplanaufstellung mit traditionellen Methoden angewandt werden. Der Vorteil der Simulation liegt zunächst nur darin, daß die komplizierte Planung und Planausarbeitung z.B. in 6 Minuten abgewickelt ist, anstatt eine Abteilung mehrere Tage lang zu beschäftigen. Die Simulation ist insofern nur als Methode zur schnellen Datenverarbeitung, nicht als eigentliches Planungshilfsmittel anzusehen.

Die Schnelligkeit eines Modelldurchlaufs und die damit gegebene Wiederholbarkeit der Planungen mit verschiedenen Ablauf- oder Entscheidungsregeln macht die Simulation jedoch zu einem Planungshilfsmittel.

Zur Verdeutlichung dieser Tatsache muß man sich vor Augen halten, daß das soeben dargestellte Problem der Aufstellung von Schiffsfahrplänen kombinatorische Aspekte aufweist. Die Entscheidung über Bestimmungsort und Fahrtzeitpunkt eines Schiffes läßt sich nicht, wie es im Modell geschieht, isoliert bewerten. Für die richtige Bewertung einer Entscheidung müßten die Folgen dieser Entscheidung für die nächsten zu bestimmenden Fahrtzeitpunkte und be-

stimmungsorte in Betracht gezogen werden.

Wird beispielsweise zu Beginn der Planungsperiode eine Fahrt nur dann ausgeführt, wenn das Schiff vollbeladen ist bzw. wenn der bestmögliche Deckungsbeitrag (II) einer Fahrt erreichbar ist, dann kann sich die Wartezeit auf Ladung für spätere Fahrten ungünstig auswirken. Das Schiff ist wegen der für Fahrzeiten verlorenen Wartezeit nicht mehr in der Lage, die in anderen Häfen später gegebenenfalls verstärkt auftretende Nachfrage zu befriedigen, während die bei früherem Fahrtantritt im zuerst betrachteten Hafen zurückbleibende Nachfrage später ohne Schwierigkeiten hätte erfüllt werden können. Insgesamt werden also weniger Transportobjekte befördert, der Deckungsbeitrag (III) für die gesamte Periode wird vermindert. Die Entscheidungsregel, den Zeitpunkt einer Fahrt durch den maximalen Deckungsbeitrag (II) einer Fahrt zu bestimmen, hat sich als ungünstig erwiesen. Eine solche negative Auswirkung muß sich jedoch nicht zwangsläufig ergeben. Irgend eine Höhe der Deckungsbeiträge (II), evtl. je Schiff und Zeitabschnitt in unterschiedlicher Höhe festgelegt, kann auch den gesamten Deckungsbeitrag (III) der Periode maximieren. Welche Entscheidungsregel es im einzelnen sein wird, hängt von den Daten, vor allem von der Nachfragestruktur ab.

Bereits für ein Schiff läßt sich schwer übersehen, welche Auswirkungen kürzeres oder längeres Warten haben mag. Berücksichtigt man nun noch, daß letztlich 12 Schiffe mit unterschiedlicher qualitativer und quantitativer Kapazität, unterschiedlichen Fahrt-, Lade- und Löschaufwendungen sowie mit verschiedenen Zeitabständen zwischen den zwangsläufigen Werftaufenthalten bei der Befriedigung einer sachlich, zeit-

lich und örtlich strukturierten Nachfrage zusammenwirken, dann wird das Ausmaß des Kombinationsproblems deutlich.

Das Simulationsmodell bietet insofern eine Entscheidungshilfe, als mit ihm alternative Entscheidungsregeln untersucht werden können. So kann beispielsweise, wie bereits erwähnt, der Deckungsbeitrag (II) je Fahrt in unterschiedlicher Höhe festgelegt werden. Damit werden zugleich die Auslastungsgrade der Schiffe, die je Fahrt beförderten Mengen und die Wartezeit mitbestimmt. Jede Entscheidung wird zwar bei jeder der Entscheidungsregeln immer nur isoliert bewertet, das Simulationsmodell ermittelt jedoch die Auswirkungen auf den maßgeblichen Deckungsbeitrag (III) der Gesamtperiode. Dieser Deckungsbeitrag (III) gibt den Wert einer Fahrplanungsalternative, die durch eine bestimmte Entscheidungsregel zustande gekommen ist, wieder.

Das Simulationsmodell erlaubt bei weitem nicht die Erfassung sämtlicher möglichen Alternativen. Es können jedoch zahlreiche Alternativen untersucht werden, und die beste unter den ermittelten Alternativen kann ausgesucht werden. Bedenkt man dabei, daß die Entscheidungsregeln evtl. intuitiv im Verlaufe eines Lernprozesses mit jedem Modelldurchlauf verbessert werden können, so wird deutlich, daß Simulationsmodelle traditionelle Planungsverfahren wesentlich verbessern können.

Die Auswahl der in das Modell einzugebenden Ablaufregeln muß allerdings ebenso wie bei traditionellen Planungsverfahren intuitiv erfolgen, und die Ablaufregeln stellen nur eine sehr kleine Auswahl aus der Vielzahl der möglichen Alternativen dar. Bei tradi-

tionellen Verfahren können vom Fahrplanbearbeiter in Einzelfällen Details intuitiv erfaßt werden, die sich in ein Simulationsmodell nicht von vornherein einbeziehen lassen. Insofern sind die Anwendungs- und Erfolgsmöglichkeiten der Simulation begrenzt. Die Simulation bietet jedoch gegenüber traditionellen Verfahren den Vorteil, daß die Beurteilung der komplizierten Auswirkungen der Alternativen im Gesamtmodell wesentlich rationaler möglich wird, da durch eine Vielzahl von Testläufen Erfahrungen für Korrekturen gesammelt werden können, die sonst erst durch einen langwierigen trial- und error-Prozeß aus den tatsächlichen Abläufen abgeleitet werden können.

C. Fahrplanung als dynamisches Entscheidungsproblem
- Betonung der zeitlichen Zuordnung

I. Einführung in das Problem

1) Alternativenabfolgen

In den bisher dargestellten Modellen wurde von einer Nachfrage ausgegangen, die nicht eher fortfällt, bis sie befriedigt ist. Es ist nun zu berücksichtigen, daß die Nachfrage in manchen Fällen nur während mehr oder weniger langen Zeitabschnitten bestehen bleibt. Erfolgt in diesen Zeitabschnitten keine den gewünschten Ortsveränderungen entsprechende Fahrt, können die Ortsveränderungen nicht ausgeführt werden, die entsprechenden Erträge gehen verloren.

Für die Bewertung einer Fahrtalternative genügt es nicht, die durch eine Fahrt zu bewirkenden Erträge und Aufwendungen zu berücksichtigen. Auch die Folgen

einer Fahrt müssen erfaßt werden. Ein Beispiel kann das verdeutlichen. Die Fahrt eines Fahrzeuges auf der Strecke von A nach B ermöglicht eine Rückfahrt von B nach A. Von A aus können sich weitere Hin- und Rückfahrten anschließen. Nimmt man an, daß alle Fahrten mit der gleichen Geschwindigkeit erfolgen und daß sich an jede Fahrt nach einer technisch notwendigen Wendezeit sofort die nächste anschließt, ist dies Fahrplanungsproblem relativ einfach zu lösen. Offensichtlich ist bei zwangsläufig miteinander verknüpften Fahrten die Summe der Deckungsbeiträge aller Fahrten vom Abfahrtszeitpunkt der ersten Fahrt abhängig. Dadurch sind den alternativ möglichen ersten Abfahrtszeitpunkten die jeweils durch sie bedingten Erträge und Aufwendungen eindeutig zu rechnenbar.

Fehlt dagegen die zwangsläufige Aneinanderreihung der Fahrten, genügt es nicht, nur die erste Alternative zu bewerten und festzulegen. Nach jeder Ankunft muß erneut ein optimaler Abfahrtszeitpunkt festgelegt werden. Gesucht wird nun die optimale Abfolge von Alternativen. Jede Alternativenabfolge kann zu anderen Ergebnissen führen und stellt deswegen eine Gesamtalternative dar, die zu bewerten und mit den übrigen zu vergleichen ist.

Die Enumeration der Gesamtalternativen ist bereits bei geringem Problemumfang kaum möglich. Man kann sich dies am Beispiel des zwischen A und B verkehrenden Fahrzeuges verdeutlichen. Um das Problem besser darstellen zu können, soll es weiter formalisiert werden. In $i = 0$ bis m Zeitpunkten möge sich das Fahrzeug jeweils in A oder B befinden. In diesen zwei Zuständen sind je Entscheidungszeitpunkt 0 bis $m-1$ ¹⁾

1) Im Zeitpunkt m sind keine Entscheidungen mehr möglich.

jeweils zwei Alternativen möglich: fahren oder warten. Nach einer Fahrtalternative ändert sich die Ortskomponente des Zustands, nach einer Wartealternative bleibt sie bestehen. In jedem Fall erfolgt ein Übergang zum nächsten Entscheidungszeitpunkt und damit zu einer neuen Entscheidungssituation.

Steht das Fahrzeug zu Beginn der Periode im Zeitpunkt $i = 0$ beispielsweise in A, lassen sich die ersten beiden von A ausgehenden Entscheidungsmöglichkeiten mit den darauffolgenden zwei Entscheidungsmöglichkeiten zu vier Gesamtalternativen verbinden:

- 1) zweimal in A warten,
- 2) einmal in A warten, dann nach B fahren,
- 3) nach B fahren, dann in B warten,
- 4) nach B fahren, dann wieder nach A fahren.

Im Endzustand jeder der vier Gesamtalternativen lassen sich wieder jeweils zwei Alternativen hinzufügen, so daß bis zum dritten Entscheidungszeitpunkt insgesamt acht Gesamtalternativen entstehen. Die Gesamtalternativen lassen sich in diesem Beispiel offensichtlich als Zweierpotenzen ausdrücken: im ersten Entscheidungszeitpunkt ($i=0$) gibt es 2^1 , im zweiten 2^2 , im dritten 2^3 und im vierten 2^4 . Um die Zahl der Gesamtalternativen zu erhalten, muß man demnach die Zahl der möglichen Zustände je Zeitpunkt mit der Anzahl der Entscheidungszeitpunkte potenzieren. Bei 25 Entscheidungszeitpunkten gibt es beispielsweise 2^{25} oder über 33 Millionen Gesamtalternativen.

Eine Gesamtalternative besteht aus sämtlichen während der Planungsperiode festgelegten aufeinanderfolgenden Alternativen. Tauscht man nur eine Alternative in dieser Kette aus, liegt eine andere Gesamtalternative vor. Ein Zustand ist einerseits von der vorhergehenden

Entscheidung abhängig, andererseits wiederum Ausgangspunkt für die folgenden Entscheidungen, so daß letztlich von jeder Entscheidung alle folgenden Entscheidungen abhängen. Diese Abhängigkeit der Entscheidungen untereinander bedingt die Vielzahl der Alternativen. Es handelt sich hier um ein kombinatorisches Problem, das in dieser Form wegen der Vielzahl von Möglichkeiten nicht durch Enumeration lösbar ist.

2) Dynamische Programmierung¹⁾

Mit der dynamischen Programmierung läßt sich das soeben beschriebene Problem in Stufen zerlegen und stufenweise lösen.

Man kann das Verfahren der dynamischen Programmierung mit den Entscheidungen auf der letzten Entscheidungsstufe ($m-1$) beginnen. Von jedem der dann möglichen Zustände läßt sich unter den Alternativen, die zum Endzustand oder den Endzuständen führen, die beste festlegen. Der Wert der Zustände der letzten Entscheidungsstufe ($m-1$) ist dann durch die Werte der jeweils von dort möglichen besten Alternative auszudrücken.

Im Lösungsverfahren geht man nun rekursiv von der letzten zur vorletzten Entscheidungsstufe ($m-2$) zurück und untersucht die von den dann möglichen Zuständen ausgehenden Alternativen. Im Hinblick auf

1) vgl. Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton 1957;
Rudley, G., Nonlinear and Dynamic Programming, Reading (Mass.) 1964;
Neuhäuser, G.L., Introduction to Dynamic Programming, New York 1966;
Wentzel, J.S., Elemente der dynamischen Programmierung, München, Wien 1966;

die gesamte Alternativenabfolge ist dabei nicht nur der isolierte Wert der Alternativen heranzuziehen. Vielmehr muß der Wert der erreichten Zustände der letzten Stufe ($m-1$) mitberücksichtigt werden, denn offensichtlich ist es sinnvoll, einen Zustand anzustreben, von dem aus anschließend hochbewertete Alternativen möglich sind. Zur Bewertung eines Zustandes der Stufe ($m-2$) wird nun also jedem Wert der von dort ausgehenden Alternativen der Wert der erreichten Zustände der Stufe ($m-1$) hinzugezählt. Der beste dieser summierten Werte ist dann der Wert des Zustandes der Stufe ($m-2$).

In der gleichen Weise geht man dann zur Bewertung der Zustände in ($m-3$), ($m-4$) usw. über. Von jedem Zustand wird jeweils die bis zur letzten Stufe beste Abfolge von Alternativen festgelegt und der Wert dieser Folge dem Zustand, von dem die Folge ausgeht, zugerechnet. Für jeden Zustand liegt somit nach Abschluß der Bewertungen dessen Wert im Rahmen des Gesamtproblems und die von dort aus optimale restliche Alternativenabfolge bis zum Endzustand fest.

Erreicht man die Zustände der Entscheidungsstufe 0, stellen die Werte der Zustände zugleich die Werte einer von 0 bis ($m-1$) durchgehenden Alternativenabfolge dar. Der Zustand mit dem höchsten Wert ist der Ausgangszustand der optimalen Abfolge. Ist nur ein Ausgangszustand möglich, liegt der Wert der besten Abfolge fest, sobald dieser Ausgangszustand bewertet ist.

Das Prinzip der dynamischen Programmierung, die optimale Fortsetzung einer Alternativenabfolge in bezug auf die Zustände, von der die Abfolge ausgehen kann,

festzulegen, nennt man nach Bellman das Optimalitätsprinzip.¹⁾

Das Verfahren der dynamischen Programmierung setzt voraus, daß die einzelnen Alternativen jeder Stufe ohne Kenntnis der Alternativen der Vorstufen bewertet werden können. Nur dann wird der Gesamtwert einer Alternativenabfolge durch die Summe der Bewertungen wiedergegeben. Die Bewertung einer Alternative darf also nicht von der "Vorgeschichte" der Alternative abhängen.²⁾ Sind unabhängige Bewertungen möglich, spricht man von einer additiven Zielfunktion.³⁾

Die Anwendung der dynamischen Programmierung auf das eingangs erwähnte Beispiel mit 25 Entscheidungszeitpunkten verringert die Zahl der notwendigen Bewertungen erheblich. Statt über 33 Millionen Gesamtalternativen zu bewerten, genügt es nunmehr, 98 Alternativen⁴⁾ zu bewerten.

1) vgl. Wentzel, J.S., a.a.O., S. 15;

2) vgl. Wentzel, J.S., a.a.O., S. 37, S. 104 ff.;

3) vgl. Wentzel, J.S., a.a.O., S. 37, S. 104 ff.;

4) Auf 24 der 25 Stufen des Problems sind jeweils 4 Alternativen möglich: in A oder B jeweils warten oder fahren. Für die erste Stufe ($m=0$) liegt der Ausgangsort A fest, so daß von dieser Stufe aus nur 2 Alternativen möglich sind. Insgesamt sind also $4 \cdot 24 + 2 = 98$ Alternativen zu bewerten.

II. Grundmodell

1) Modellaufbau

Auf einer Strecke mit den Stationen A und B steht ein Fahrzeug zur Verfügung. Die zur genaueren Problemformulierung erforderlichen Daten sind bekannt und werden beim Modellaufbau an geeigneter Stelle erwähnt. Es ist ein gewinnmaximaler Fahrplan aufzustellen.

Dies Problem ist in einem Modell so zu formulieren, daß es mit der dynamischen Programmierung gelöst werden kann. Im einzelnen müssen die Dauer der Planungsperiode, Anfangs- und Endzustände sowie die Einteilung in Entscheidungsstufen festgelegt werden.

Die Dauer der Planungsperiode läßt sich nicht ohne eine gewisse Willkür festlegen, so daß Zusammenhänge zwischen den Zeitabschnitten vor und nach der Periode zertrennt werden. Ist die Periode relativ lang, wirkt sich ein solches Zertrennen schwächer aus als bei kurzen Perioden. Bei der Aufstellung eines Halbjahresfahrplans kann z.B. der Übergang auf das nächste Halbjahr zunächst vernachlässigt werden. In manchen Fällen kann eine explizite Berücksichtigung von Zusammenhängen durch eine entsprechende Bewertung annähernd ersetzt werden. Exakte Maßstäbe für die Bewertung gibt es allerdings nicht. Die günstigste Abgrenzung ist zu erreichen, wenn die Dauer der Planungsperiode mit dem Zeitabschnitt zwischen den Zwangsruhezeiten beweglicher Mittel übereinstimmt. Die Fahrplanung für 1 Fahrzeug könnte z.B. mit dem Ende einer Fahrzeugwartung beginnen und mit dem Beginn der nächsten Wartung enden. In unserem Beispiel möge eine solche Periode 6 Stunden umfassen.

Die Anfangs- und Endzeiten der Fahrplanungsperiode sind durch die Angabe der Fahrzeugstandorte zu vollständigen Zustandsbeschreibung zu ergänzen. Ohne Beeinträchtigung der Lösungsmöglichkeiten können mehrere Fahrzeugstandorte alternativ zugelassen werden. Der jeweils beste wird dann während des Lösungsganges festgelegt. Sollen Planungsergebnisse einer Periode unverändert auf folgende, gleichlange Perioden übertragen werden, müssen die Übergänge allerdings durch gleiche Anfangs- und Endorte sichergestellt sein. Die Festlegung der Ortskomponente der Anfangs- und Endzustände ist außerdem dann eindeutig vorzunehmen, wenn die Zwangsruhezeiten der beweglichen Mittel zu Beginn und Ende der Periode in bestimmten Depots enden und beginnen müssen. In unserem Beispiel soll angenommen werden, daß das Fahrzeug von einem Depot in der Station A seine Fahrten beginnt und am Ende der Planungsperiode die Fahrten dort abschließen muß.

Die Entscheidungsstufen sind so festzulegen, daß Entscheidungsorte und -zeitpunkte zusammenfallen, und die derart definierten Zustände von den Fahrzeugen mit ökonomisch sinnvollen Geschwindigkeiten erreichbar sind.

Als Entscheidungsorte sind dabei möglichst die wichtigsten Stationen und Streckenpunkte auszuwählen. Sie sind wichtig, wenn sich dort Entscheidungen verwirklichen lassen, die sich stark auf die Zielfunktion auswirken können.¹⁾

Die Entscheidungszeitpunkte müssen so festgelegt werden, daß die Zeitabstände weder zu groß noch zu klein werden. Zu große Zeitabstände erfassen nicht die innerhalb der Abstände entstehende und fortfallende Nachfrage. Zu kleine Zeitabstände bewirken, daß die Nach-

1) Erträge und Aufwendungen aus den zwischen den ausgewählten Stationen liegenden, außerdem angefahrenen Stationen können den ausgewählten Stationen zugerechnet werden und als Bewertungsgrundlage dienen. Da die Entscheidungen für die Zwischenstationen bereits getroffen sein müssen, begibt man sich zwar möglicherweise Freiheitsgrade der Planung, kann durch die Auswahl nur weniger Stationen aber den Problemmumfang erheblich reduzieren.

frage von einem zum nächsten Zeitpunkt übertragen wird, so daß die Bewertung der Alternativen der beiden Zeitpunkte mit Erträgen nicht mehr isoliert möglich ist. Die Zielfunktion ist dann nicht mehr additiv, die dynamische Programmierung nicht mehr anwendbar.

Bei der Festlegung der Fahrzeuggeschwindigkeiten muß neben den technischen Grenzen der Einfluß auf die Zielfunktion berücksichtigt werden. Tendenziell führen hohe Geschwindigkeiten zu hohen Aufwendungen, wirken sich jedoch zugleich günstig auf die Erträge aus.

Die zur Bildung von Entscheidungsstufen erforderliche Abstimmung der 3 Komponenten Ort, Zeit und Fahrzeuggeschwindigkeit ist bereits ein recht komplexes Optimierungsproblem, das bereits bei der Modellbildung gelöst werden muß. Da keine exakten Lösungsverfahren zur Verfügung stehen, muß die Abstimmung intuitiv vorgenommen werden.

Es ist sinnvoll, innerhalb der zulässigen Grenzen gleichlange Zeitabstände zu wählen und die Entscheidungsabstände so festzulegen, daß die Abstände ungefähr gleich lang sind. Die derart definierten möglichen Zustände müssen innerhalb der Geschwindigkeitsgrenzen der Fahrzeuge erreichbar sein. Unterschiedliche Ortsabstände können durch entsprechend festzulegende Geschwindigkeiten oder Wartezeiten in den Entscheidungsorten so ausgeglichen werden, daß die Zeitabstände jeweils gleich lang bleiben.

Zugunsten der Lösbarkeit ist dies Modell nicht mehr vollständig isomorph mit dem tatsächlich vorliegenden Entscheidungsproblem. Theoretisch wären an unendlich vielen Zeitpunkten und Orten Entscheidungen über Fahrzeugfahrten und -geschwindigkeiten denkbar. Im Inter-

esse der Lösbarkeit muß aber zu der diskontinuierlichen Betrachtung der Zeiten und Orte und der Fixierung der Geschwindigkeiten übergegangen werden.

In dem hier gewählten einfachen Beispiel wird angenommen, daß jede Stunde eine Entscheidung zu treffen ist, und daß die zu jeder Stunde bestehende Nachfrage entfällt, wenn sie nicht durch eine Fahrt befriedigt wird. Die Zeitabstände sollen gleich bleiben. Dies wird mit der Annahme erreicht, daß die durch eine Entscheidung auszulösenden Vorgänge jeweils eine Stunde dauern. Die Fahrt von A nach B und von B nach A erfolgt mit gleichbleibender Geschwindigkeit und erfordert einschließlich vorhergehender und nachträglicher Wendezeiten eine Stunde. Wartealternativen ziehen eine Wartezeit von ebenfalls einer Stunde nach sich. In den Wartezeiten sollen die technisch erforderlichen Vorbereitungs- und Abschlußzeiten bereits enthalten sein. Zu Beginn und Ende der Periode treten an ihre Stelle Zeiten für Fahrten vom und zum Depot.

Die bisher gemachten Angaben beschreiben ein System mit 6 Entscheidungszeitpunkten und den möglichen Fahrzeugstandorten in A oder B. Im Zeitpunkt $i = 0$ befindet sich das System im Anfangszustand A_0 , im Zeitpunkt $i = 6$ im Endzustand A_6 . In den Zeitpunkten $i = 1-5$ sind die Zustände A und B alternativ möglich. Von jedem der Zustände aus, außer vom Endzustand, sind grundsätzlich zwei Alternativen möglich: fahren oder warten. Sie führen entweder zu einem anderen oder zum gleichen Ort und immer zum nächsten Zeitpunkt. Die Zustände zu Beginn und Ende einer Alternative beschreiben also zugleich diese Alternative. Dementsprechend kann das Warten durch $A_i A_{i+1}$ und $B_i B_{i+1}$, das Fahren durch $A_i B_{i+1}$ und $B_i A_{i+1}$ symbolisiert werden.

In 6 Zeitpunkten ist aus den jeweils möglichen Alternativen je eine so festzulegen, daß die Alternativenabfolge (Gesamtalternative) ($E_0, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5$) optimal wird. Diese optimale Alternativenabfolge ist dann zugleich die optimale Gesamtalternative.¹⁾

Die für die Beurteilung der Alternativen erforderliche Zielfunktion sei durch folgende Zahlenwerte gegeben: der Aufwand für eine Fahrt zwischen A und B oder B und A beträgt 40,- DM. Das Warten in A und B zieht Aufwand in Höhe von 3,- DM nach sich. Die Ertragsfunktion ist aus der Nachfragestruktur abgeleitet. Für jede mögliche Fahrt ist der Ertrag bekannt:

$i =$	0	1	2	3	4	5
$A_i B_{i+1}$	20	40	40	80	60	40
$B_i A_{i+1}$	-	60	30	20	20	50

Aufwands- und Ertragsfunktion können zur Gewinn- oder Deckungsbeitragsfunktion zusammengefaßt werden:

$i =$	0	1	2	3	4	5
$A_i B_{i+1}$	-20	0	0	40	20	0
$B_i A_{i+1}$	-	20	-10	-20	-20	10
$A_i A_{i+1}$	=	-3	für $i = 0$ bis 5			
$B_i B_{i+1}$	=	-3				

1) Die Zahl der zu enumerierenden Gesamtalternativen beträgt in diesem kleinen Beispiel nur 32, so daß die Lösungsvereinfachung durch die dynamische Programmierung (20 Bewertungen) hier nicht so deutlich wird. Je mehr Entscheidungsstufen einbezogen werden, umso deutlicher werden die Vereinfachungen.

2) Lösungsgang

Der Lösungsgang muß möglichst systematisch durchgeführt werden, damit er übersichtlich bleibt. Je schematischer er ist, desto leichter läßt er sich außerdem für einen Computer programmieren. Es bieten sich die Darstellung mit Hilfe von Matrizen und die graphische Darstellung an. Anhand der Matrixdarstellung läßt sich der Lösungsgang am besten schrittweise erläutern, mit der graphischen Darstellung lassen sich kleine Probleme anschaulich zusammenfassen.

Ausgangspunkt der Lösung sind die Zustände A_5 und B_5 . Die von dort ausgehenden Alternativen müssen im Endzustand A_6 enden, so daß nur die Alternativen A_5A_6 und B_5A_6 möglich sind. Diese Alternativen sind nun mit den Deckungsbeiträgen zu bewerten. Die Werte der Alternativen, die zugleich die Werte des Ausgangszustandes der Alternativen darstellen, sind in einer Zusatzspalte hinter der Matrix zu vermerken. Diese Werte werden für den nächsten rekursiven Schritt benötigt. In der ersten Matrix ist nur ein Wert je Zeile möglich. Bei mehreren Werten je Zeile entspricht das Zeilenmaximum dem Wert der besten Alternative, die von einem Zustand ausgeht und auch den Wert des Zustandes determiniert. In einer weiteren Zusatzspalte ist außerdem noch die Alternative selber, die zu diesem Wert führt, anzugeben. Sie wird für die spätere Festlegung der optimalen Alternativenabfolge benötigt.

1. Matrix

	A_6	B_6			
A_5	-3	-	-	-3	A_5A_6
B_5	10	-	-	10	B_5A_6

Die Werte in der ersten Zusatzspalte sind für den nächsten rekursiven Schritt die Zustandswerte, die zu den isolierten Werten der Alternativen dieses nächsten Schrittes hinzuzuzählen sind. Zur Verdeutlichung des Zusammenhanges werden deswegen die Werte der Zusatzspalte der ersten Matrix in eine Kopfzeile der zweiten Matrix eingetragen. Die Matrixfelder der 2. Matrix sind mit der Summe aus Kopfzeilenwert und dem aus der Deckungsbeitragsfunktion entnommenen isolierten Entscheidungswerten zu bewerten. Die Zeilenmaxima dieser Matrix kennzeichnen die von den Zuständen A_4 und B_4 ausgehenden besten Alternativen.

2. Matrix

	A_5	B_5		
	-3	10		
A_4	-6	30	30	$A_4 B_5$
B_4	-23	7	7	$B_4 B_5$

Ähnlich ist bei den folgenden Matrizen zu verfahren. Die Werte der 1. Zusatzspalte einer Matrix sind jeweils für die nächste als Kopfzeile vorzutragen.

3. Matrix

	A_4	B_4		
	30	7		
A_3	27	47	47	$A_3 B_4$
B_3	10	4	10	$B_3 A_4$

4. Matrix

	A_3	B_3		
	47	10		
A_2	44	10	44	$A_2 A_3$
B_2	37	7	37	$B_2 A_3$

5. Matrix

	A_2	B_2		
	44	37		
A_1	41	37	41	$A_1 A_2$
B_1	64	34	64	$B_1 A_2$

6. Matrix

	A_1	B_1		
	41	64		
A_0	38	44	44	$A_0 B_1$
B_0	-	-		

In der letzten Matrix ist nur 1 Zeile auszufüllen, Dem entspricht die Tatsache, daß nur 1 Ausgangszustand (A_0) zulässig ist. Der letzte maximale Zeilenwert ist zugleich der mit der optimalen Alternativenabfolge erreichbare optimale Wert des Gesamtproblems. Die optimale Alternativenabfolge ergibt sich, wenn man von der zuletzt ermittelten, besten Alternative in A_0 ausgeht. Der dadurch erreichte Zustand ist der Ausgangszustand der nächsten Alternative, der dadurch erreichte Zustand der Ausgangszustand der folgenden Alternative usw.. Da für jeden Zustand die jeweilige beste Alternative

bereits ermittelt ist und in der letzten Zusatzspalte jeweils vermerkt ist, lassen sich auf diese Weise, progressiv vorgehend, die besten Alternativen zur optimalen Alternativenabfolge verknüpfen. Die optimale Alternativenabfolge lautet:

$A_0B_1, B_1A_2, A_2A_3, A_3B_4, B_4B_5, B_5A_6$.

Sie ist zugleich die beste Gesamtalternative sämtlicher Gesamtalternativen.

Für eine graphische Darstellung des Lösungsgangs trägt man auf der Abszisse eines Koordinatenkreuzes die Zeitpunkte $i = 0$ bis 6 und auf der Ordinate die Ortskomponenten A und B ab. Die möglichen Zustände lassen sich nun durch Orts- und Zeitkoordinaten ausdrücken. Beginnend bei den Zuständen A_5 und B_5 werden wieder die Werte einzelner Alternativen ermittelt, wird die von jedem möglichen Zustand aus jeweils beste Alternative, unter Beachtung der Folgen einer Alternative, ausgewählt und der Wert der besten Alternative dem entsprechenden Zustand zugerechnet. Der Wert wird an den Zuständen vermerkt, die jeweils beste Alternative durch eine dünn ausgezogene Linie zu dem durch sie erreichten Zustand festgehalten (vgl. Abb. 1). Ist schließlich die vom Anfangszustand A_0 ausgehende Alternative ermittelt, kann die optimale Alternativenabfolge, den dünn ausgezogenen Linien nachgehend, ermittelt werden. Die optimale Alternativenabfolge ist als dick ausgezogene Linie dargestellt.

Die ermittelte Alternativenabfolge ist das Ergebnis der Fahrplanung, ausgedrückt in der im Modell gebrauchten Symbolsprache. Dies Planungsergebnis ist nun zu Fahrplänen, die verschiedene Informationsaufgaben erfüllen können, umzugliedern und umzuformen.

Ortskomponente
der Zustände

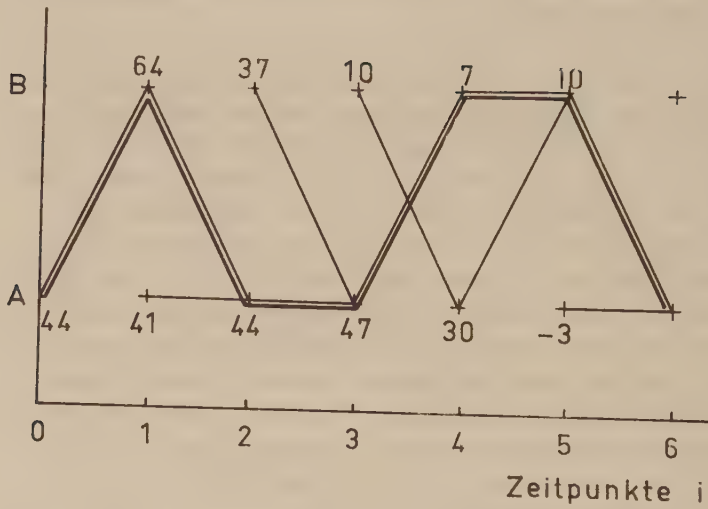
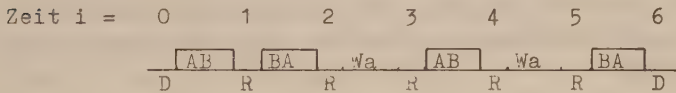


Abb. 1

Aus der Alternativenabfolge läßt sich einmal der Plan der Abfahrts- und Ankunftszeiten (Fahrplan i.e.S.) ableiten. Die Indizes $i = 0$ bis 6 sind als Uhrzeiten zu interpretieren.

	von A nach B	von B nach A
ab A	0 3	ab B 1 5
an B	1 4	an A 2 6

Die gleiche Alternativenabfolge läßt sich auch in der Form eines Fahrzeuglaufplans darstellen. Im Laufplan können die konstanten und unbeeinflussbaren Zeiten für Depotfahrten, Rangieren und Wenden zusätzlich vermerkt werden. Im Planungsmodell und im Plan der Abfahrts- und Ankunftszeiten konnten sie der Einfachheit halber unberücksichtigt bleiben.



AB, BA	=	Fahrzeiten
D	=	Zeiten für Fahrten vom und zum Depot
R	=	Rangier- und Wendezeiten
Wa	=	Wartezeiten

III. Möglichkeiten und Grenzen der Erweiterung des Grundmodells

1) Grundsätzliche Grenzen der Problemzerlegung mit der dynamischen Programmierung

Wie gezeigt wurde, läßt sich mit der dynamischen Programmierung unter bestimmten Voraussetzungen die totale Enumeration der möglichen Alternativenabfolgen vermeiden und ein relativ einfacher Lösungsgang finden.

Vorauszusetzen ist dabei jedoch, daß sich das Problem in Entscheidungsstufen zerlegen läßt und daß die Bewertung der Alternativen einer Stufe unabhängig von den Alternativen anderer Stufen ist. Anderenfalls versagt die dynamische Programmierung.

Sie versagt aber nur für die Zerlegung der tatsächlich interdependenten Alternativen. Da häufig keine Bewertungsinterdependenzen über die gesamte Periode hinweg bestehen, ist insoweit noch eine Zerlegung möglich. Als Bezugseinheit für die Bewertung können in diesen Fällen die Kombinationen der zusammenhängenden Alternativen gewählt werden. Der Problemumfang nimmt dann erheblich zu, und zwar umso mehr, je mehr Alternativen interdependent sind. Hängen im Extremfall die Bewertungen sämtlicher Alternativen voneinander ab, läßt sich mit der dynamischen Programmierung keinerlei Vereinfachung mehr erreichen. Die totale Enumeration aller Gesamtalternativen läßt sich dann nicht vermeiden.

Die interdependente Bewertung von Alternativen wird vor allem durch die folgende Nachfragestruktur bewirkt: Die Nachfrage eines Zeitpunktes fällt bis zum nächsten Zeitpunkt nur dann fort, wenn sie erfüllt wird. Wird sie nicht erfüllt, wird ein Teil der Nachfrage auf den nächsten Zeitpunkt übertragen und muß dann bei der Bewertung der folgenden Alternativen berücksichtigt werden. Der Wert der folgenden Alternativen hängt insofern davon ab, wie die vorhergehenden Entscheidungen ausgefallen sind.

Wenn dagegen die gesamte Nachfrage vom 1. Zeitpunkt an gegeben ist, und die noch unbefriedigte Nachfrage jeweils vollständig immer wieder auf den nächsten Zeitpunkt übergeht, vereinfacht sich die Problemlösung. Da

die Einsatzzeitpunkte der Fahrzeuge dann ohne Einfluß auf die Bewertung der Fahrten sind, erübrigt sich die Untersuchung von Alternativenabfolgen. An die Stelle dynamischer Modelle können statische Modelle treten.

Problemvereinfachungen sind demnach grundsätzlich nur in zwei Grenzfällen möglich: vollständiger Fortfall der unbefriedigten Nachfrage bis zum nächsten Entscheidungszeitpunkt oder vollständige Übertragung der unbefriedigten Nachfrage bis zum Ende der Planungsperiode. Im ersten Fall ist die dynamische Programmierung anwendbar, im zweiten Fall vor allem die im Hauptabschnitt B erwähnten Zuordnungsmodelle und kombinatorischen Modelle.

Für die auf einer Entscheidungsstufe der dynamischen Programmierung bestehenden Zusammenhänge bietet die dynamische Programmierung in keinem Falle Vereinfachungsmöglichkeiten. Die Alternativen einer Stufe sind also vollständig zu enumerieren.

In diesem Abschnitt soll nun versucht werden, einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit der dynamischen Programmierung bei der Anwendung auf Fahrplanungsprobleme zu verschaffen. Anhand dieser Untersuchungen kann beurteilt werden, ob außer Erklärungsmodellen auch praktikable Entscheidungsmodelle lösbar sind.

Es kann zwischen quantitativen und qualitativen Modellerweiterungen unterschieden werden. Quantitative Erweiterungen liegen vor, wenn das Grundmodell durch zusätzliche Fahrzeuge oder durch zusätzliche Strecken und Stationen erweitert wird. Durch quantitative Modellerweiterungen wächst die Zahl der auf einer Entscheidungsstufe zu bewertenden Alternativen. Als qualitative Modellerweiterung wird die Einbeziehung zusätzlicher, im Grundmodell bisher noch nicht er-

faßter Daten angesehen. Über die Auswirkungen qualitativer Modellerweiterungen läßt sich keine generelle Aussage treffen.

2) Quantitative Modellerweiterungen

a) Überblick

Das Ausmaß der Problemerkweiterung ist nicht nur von der Anzahl zusätzlicher Stationen und Fahrzeuge, sondern auch von der Art der Erweiterungen abhängig.

Zusätzliche Stationen können durch Strecken untereinander so vollständig verbunden sein, daß von jeder Station jede andere direkt erreichbar ist. Die Zahl der möglichen Alternativen verringert sich demgegenüber, wenn die Stationen nur zum Teil direkt verbunden sind. Es ist außerdem durch Vorentscheidungen außerhalb des Modells möglich, in einigen Stationen die Zahl der Alternativen zu reduzieren. So kann man festlegen, daß in einer Station nie zu warten ist oder daß immer eine Wartezeit von bestimmter Dauer einzulegen ist.¹⁾

Der Problemumfang hängt weiterhin von der Art der zusätzlichen Fahrzeuge ab. Die Fahrzeuge können unterschiedliche Aufwendungen pro Fahrt erfordern und eine unterschiedliche Aufnahmefähigkeit für Objekte aufweisen. Die unterschiedliche Aufnahmefähigkeit bedingt verschieden hohe Ertragsmöglichkeiten pro Fahrt. Sind die Fahrzeuge in diesem Sinne verschieden, ist die Bewertung einer Fahrt von dem Fahrzeug abhängig, das die Fahrt ausführt. Will man eine Fahrtalternative bewerten, ist also nicht nur nach Abgangs- und Bestimmungsort sondern auch nach der Art des benutzten Fahrzeugs zu unterscheiden.

1) Diese Vorentscheidungen sind, wie bereits erwähnt, beim Aufstellen des Grundmodells zu treffen. Sie erlauben eine sinnvolle Bewertung der Alternativen, die von den ausgewählten Stationen ausgehen und tragen erheblich zu einer Reduzierung des Problemumfangs bei.

Die Zahl der zu bewertenden Alternativen ist demgegenüber um so geringer, je mehr Fahrzeuge gleichartig sind, denn bei gleichartigen Fahrzeugen sind die in einem Zeitpunkt möglichen Alternativen nur noch von den Abgangs- und Bestimmungsstationen abhängig, nicht mehr vom eingesetzten Fahrzeug.

Je vollständiger die zusätzlichen Stationen zusammenhängen und je mehr Fahrzeuge verschiedenartig sind, umso umfangreicher wird das dynamische Modell. Andererseits lassen sich bei vollständig zusammenhängenden Stationen kombinatorische Gesetzmäßigkeiten ermitteln, die es erlauben, die Zahl der möglichen Alternativen einer Stufe als eine Funktion der Stations- und Fahrzeugzahl zu formulieren. Anhand solcher Funktionen kann man sich schnell einen Überblick über den maximal denkbaren Problemumfang verschaffen. Bei weniger vollständigen Kombinationsmöglichkeiten der Stationen und Fahrzeuge muß jedes einzelne Problem dagegen gesondert untersucht werden.

b) Der Problemumfang bei verschiedenartigen Fahrzeugen in einem vollständig verbundenen Netz

Es soll zunächst davon ausgegangen werden, daß jede zusätzliche Station mit allen anderen direkt verbunden ist und daß sich jedes zusätzliche Fahrzeug von allen anderen Fahrzeugen hinsichtlich Fahrtaufwand und Ladefähigkeit unterscheidet. Gefragt wird nach dem Problemumfang in Abhängigkeit von der Zahl der Stationen und Fahrzeuge.

Hält man die Zahl der Stationen konstant, ist die Zahl der Zustände auf einer Entscheidungsstufe von der Fahrzeugzahl abhängig. Bei einem Fahrzeug und zwei Stationen waren im Grundmodell zwei alternative Zustände in jedem Zeitpunkt zu unterscheiden: das Fahrzeug konnte

sich in A oder in B befinden. Bei zwei Fahrzeugen sind vier Zustände möglich:

- 1) Beide Fahrzeuge stehen in A
- 2) Fahrzeug 1 steht in A, Fahrzeug 2 in B
- 3) Fahrzeug 2 steht in A, Fahrzeug 1 in B
- 4) Beide Fahrzeuge stehen in B

Symbolisch sind die vier Zustände durch (AA) (AB) (BA) und (BB) zu kennzeichnen. Die erste Stelle der geordneten Mengen gibt jeweils den Standort des ersten Fahrzeugs, die zweite den des zweiten Fahrzeugs an. Wie drei Fahrzeuge können die Systemzustände entsprechend durch Dreierkombination der Buchstaben A und B gekennzeichnet werden. Es gibt 8 solcher Dreierkombinationen: (AAA), (AAB), (ABA), (ABB), (BAB), (BBA), (BAE) und (BAA).

Hält man umgekehrt die Zahl der Fahrzeuge konstant, ist die Zahl der Zustände von der Zahl der Stationen abhängig. Für zwei Stationen und zwei Fahrzeuge waren vier Zustände möglich, bei drei Stationen und 2 Fahrzeugen sind die möglichen 9 Zustände durch geordnete Mengen der Buchstaben A B C zu symbolisieren: (AA), (AB), (AC), (BA), (BB), (BC), (CA), (CB), (CC).

Mathematisch läßt sich die Zahl der Zustände in Abhängigkeit von Fahrzeug- und Stationenzahl als Variation mit Wiederholung ($V_{n,k} = n^k$) ausdrücken. Die Formel bringt zum Ausdruck, daß n Elemente zur k -ten Klasse variiert werden. Der Zahl der Elemente n entspricht die Zahl der Stationen A B C usw. Die k -te Klasse wird durch die Fahrzeugzahl wiedergegeben. Bezeichnet z die Zahl der Zustände, st und f die der Stationen und Fahrzeuge, so ist $z(st, f) = st^f$. Für jede beliebige Stationen- und Fahrzeugzahl läßt sich nun die davon abhängige Zahl der Zustände angeben. Auf diese Weise ist der Umfang eines Problems bereits vor der ausführlichen Formulierung abzuschätzen. So lassen sich bei-

spielsweise folgende Zahlen für die Zustände, in Abhängigkeit von Stationen- und Fahrzeugzahl, ermitteln:

$z(st, f)$	$=$	st^f	$=$	
$z(2, 5)$	$=$	2^5	$=$	32
$z(3, 5)$	$=$	3^5	$=$	243
$z(4, 5)$	$=$	4^5	$=$	1024
$z(5, 5)$	$=$	5^5	$=$	3125
$z(5, 2)$	$=$	5^2	$=$	25
$z(5, 3)$	$=$	5^3	$=$	125
$z(5, 4)$	$=$	5^4	$=$	625
$z(5, 5)$	$=$	5^5	$=$	3125

Ist die Zahl der möglichen Zustände bekannt, läßt sich die Zahl der Alternativen (a) eines Zeitpunktes leicht daraus ableiten. Unter einer Alternative ist hier die Summe der Einzelalternativen für einzelne Fahrzeuge zu verstehen. Eine Entscheidung bewirkt also den Übergang aller Fahrzeuge zum nächsten Zustand. Da von jedem Zustand eines Zeitpunktes unter den gesetzten Prämissen jeder Zustand des nächsten Zeitpunktes erreichbar ist, wird die Zahl der Alternativen durch das Quadrat der Zahl der Zustände wiedergegeben, also $a = z^2$ oder $a = st^{2f}$. Um den Problemumfang zu verdeutlichen, werden wieder einige Beispiele angeführt:

$a(st, f)$	$=$	st^{2f}	$=$	
$a(2, 5)$	$=$	2^{10}	$=$	1024
$a(3, 5)$	$=$	3^{10}	$=$	59.049
$a(4, 5)$	$=$	4^{10}	$=$	1.048.576
$a(5, 5)$	$=$	5^{10}	$=$	9.765.625
$a(5, 2)$	$=$	5^4	$=$	625
$a(5, 3)$	$=$	5^6	$=$	78.125
$a(5, 4)$	$=$	5^8	$=$	390.625
$a(5, 5)$	$=$	5^{10}	$=$	9.765.625

Jede dieser in einem Zeitpunkt denkbaren Alternativen kann sich unterschiedlich auf die Zielfunktion auswirken und muß deshalb gesondert bewertet werden. Da

die Nachfragemengen, die Preise für die Verkehrsleistungen und für die Verbrauchsgüter von Zeitpunkt zu Zeitpunkt voneinander abweichen können, sind die Bewertungen der Alternativen in jedem Zeitpunkt zu wiederholen. Es ist offensichtlich, daß selbst bei wenigen zu berücksichtigenden Fahrzeugen und Stationen der Problemumfang derartig wächst, daß Speicherplatz und Rechengeschwindigkeit auch größerer Computer nicht mehr zur Lösung ausreichen würden.

c) Der Problemumfang bei gleichartigen Fahrzeugen
in einem vollständig verbundenen Netz

Gleichartige Fahrzeuge bewirken bei gleichen Fahr- und Wartelalternativen den gleichen Aufwand und erzielen wegen gleichartiger Aufnahmefähigkeit für Transportobjekte mit einer Fahrt den gleichen Ertrag. Sind Fahrzeuge in diesem Sinne gleich, ist es beispielsweise unerheblich, ob Fahrzeug 1 oder Fahrzeug 2 in der Station A stehen. Die von diesen Zuständen ausgehenden und zu ihnen hinführenden Alternativen sind unabhängig von der Identität der Fahrzeuge zu bewerten.

Bei zwei unterschiedlichen Fahrzeugen mußten die Systemzustände durch die geordneten Mengen der Symbole A und B, (AA), (AB), (BA), (BB) gekennzeichnet werden. Die erste Stelle erfaßte den Standort des ersten Fahrzeugs, die zweite den des zweiten Fahrzeugs. Sind die beiden Fahrzeuge dagegen gleich, ist die Ordnung der Symbole gleichgültig, die Systemzustände werden durch die ungeordneten Mengen der Symbole A und B, {AA}, {BB} und {AB} wiedergegeben. Bei 3 Fahrzeugen und 2 Stationen müssen statt 6 Systemzuständen lediglich die 4 Zustände {AAA}, {AAB}, {ABB} und {BBB} berücksichtigt werden.

Die von Fahrzeug- und Stationenzahl abhängige Zahl der Systemzustände eines Zeitpunktes läßt sich somit als eine Kombination mit Wiederholung kennzeichnen. Die Anzahl der Kombinationen mit Wiederholung für n Elemente (Zahl der Stationen st) zur k-ten Klasse (Zahl der Fahrzeuge f) wird durch folgende Formel erfaßt:

$$\bar{K}_{n,k} = \binom{n+k-1}{k} = \frac{n(n+1) \dots (n+k-1)}{k!}$$

Setzt man st und f für die Zahl der Stationen und Fahrzeuge entsprechend in die Formel ein, ergibt sich:

$$\bar{K}_{st,f} = \binom{st+f-1}{f} = \frac{st(st+1) \dots (st+f-1)}{f!}$$

Nach dieser Formel läßt sich die Anzahl der Systemzustände eines Entscheidungszeitpunktes in Abhängigkeit von der Zahl der Stationen und Fahrzeuge ermitteln. Ein Vergleich mit den bisher angeführten Beispielen verdeutlicht den Unterschied in der Anzahl der Systemzustände, wenn gleichartige statt verschiedenartige Fahrzeuge unterstellt werden können:

$$z(st,f) = \frac{st(st+1) \dots (st+f-1)}{f!} \quad (z(st,f)=st^f)$$

$$z(2,5) = \frac{2(2+1)(2+2)(2+3)(2+5-1)}{5!} = 6 \quad (32)$$

$$z(3,5) = \frac{3(3+1)(3+2)(3+3)(3+5-1)}{5!} = 21 \quad (243)$$

$$z(4,5) = \frac{4(4+1)(4+2)(4+3)(4+5-1)}{5!} = 56 \quad (1024)$$

$$z(5,5) = \frac{5(5+1)(5+2)(5+3)(5+5-1)}{5!} = 126 \quad (3125)$$

$$z(5,2) = \frac{5(5+2-1)}{2!} = 15 \quad (25)$$

$$z(5,3) = \frac{5(5+1)(5+3-1)}{3!} = 35 \quad (125)$$

$$z(5,4) = \frac{5(5+1)(5+2)(5+4-1)}{4!} = 70 \quad (625)$$

$$z(5,5) = \frac{5(5+1)(5+2)(5+3)(5+5-1)}{5!} = 126 \quad (3125)$$

Die Art der Abhängigkeit der Zahl der Alternativen von Fahrzeug- und Stationenzahl läßt sich nun jedoch nicht mehr so einfach wie im Fall vollständiger Kombinationsmöglichkeiten ermitteln. Während bei verschiedenartigen Fahrzeugen jeder Zustand von jedem Zustand genau einmal zu erreichen ist, sind die unter der Annahme gleichartiger Fahrzeuge ermittelten Zustände durch mehrere Alternativen untereinander zu erreichen.

Bei zwei Stationen und zwei gleichartigen Fahrzeugen sind beispielsweise die Zustände $\{AB\}$ im Zeitpunkt i und $\{AB\}$ im Zeitpunkt $i+1$ durch zwei verschiedene Alternativen zu verbinden. Bei der Alternative "in A und B warten" behalten die Fahrzeuge ihren Standort, bei der Alternative "von A nach B und von B nach A fahren" wechseln sie ihren Standort. In beiden Fällen wird der Zustand $\{AB\}$ im Zeitpunkt $i+1$ erreicht. Da beide Alternativen offensichtlich unterschiedlich zu bewerten sind, müssen sie auch gesondert aufgezählt werden.

Ähnliche Überlegungen gelten auch bei mehr Fahrzeugen und Stationen. Die Zahl der Alternativen läßt sich dabei am besten mit Hilfe von Matrizen ermitteln. In die Matrixfelder ist die Zahl der Entscheidungen, die von einem Zustand in i zu einem Zustand in $i+1$ führen, einzutragen.

Für 2 Stationen und 4 Fahrzeuge ergibt sich z.B. folgende Matrix:

		Zustände in $t=i+1$				
		1	2	3	4	5
Zustände in $t=i$	1 {AAAA}	1	1	1	1	1
	2 {AAB}	1	2	2	2	1
	3 {AABB}	1	2	3	2	1
	4 {ABBB}	1	2	2	2	1
	5 {BBBB}	1	1	1	1	1

$a(2,4) = 35$

Die Eintragungen in die Matrixfelder lassen sich folgendermaßen erläutern: Sind alle 4 Fahrzeuge in A oder in B (Zustände $\{AAAA\}_i$ und $\{BBBB\}_i$), können von diesen beiden Zuständen aus alle anderen Zustände nur durch jeweils eine Alternative erreicht werden. Sollen umgekehrt alle 4 Fahrzeuge in A oder B stehen (Zustände $\{AAAA\}_{i+1}$ und $\{BBBB\}_{i+1}$), so ist dies von allen Zuständen im Zeitpunkt i ebenfalls nur durch eine Alternative möglich.

Sind die Fahrzeuge auf beide Stationen im Verhältnis 2 : 2 ($\{AABB\}$) aufgeteilt, so sind von dieser Aufteilung im Zeitpunkt i zu dieser Aufteilung im Zeitpunkt $i+1$ 3 Alternativen möglich:

- 1) alle Fahrzeuge warten,
- 2) ein Fahrzeug fährt von A nach B, ein anderes fährt von B nach A,
- 3) die 4 Fahrzeuge wechseln ihren Standort.

In den restlichen Fällen ist jeweils mindestens eine Fahrzeugaufteilung im Verhältnis 3 : 1 als Ausgangs- oder Bestimmungszustand beteiligt. Es sind dann jeweils 2 Übergangsalternativen möglich. Die Zahlen der jeweils möglichen Alternativen werden in die

entsprechenden Matrixfelder eingetragen und dann addiert. Insgesamt sind im vorliegenden Fall 35 Alternativen in einem Zeitpunkt möglich.

In der gleichen Weise lassen sich weitere Matrizen aufstellen. Beispielsweise ergibt sich für 3 Stationen und 3 Fahrzeuge folgende Matrix:

		Zustände in $t=i+1$									
Zustände in $t=i$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 {AAA}		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 {AAB}		1	2	2	2	3	2	1	2	2	1
3 {AAC}		1	2	2	2	3	2	1	2	2	1
4 {ABB}		1	2	2	2	3	2	1	2	2	1
5 {ABC}		1	3	3	3	6	3	1	3	3	1
6 {ACC}		1	2	2	2	3	2	1	2	2	1
7 {BBB}		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8 {BBC}		1	2	2	2	3	2	1	2	2	1
9 {BCC}		1	2	2	2	3	2	1	2	2	1
10 {CCC}		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

$$a(3, 3) = 165$$

Mit zunehmender Zahl von Stationen und Fahrzeugen sind derartige Matrizen nur mit großem Zeitaufwand aufzustellen. Es ist daher wünschenswert, eine Funktion zu finden, die die Zahl der Alternativen in Abhängigkeit von Stationen- und Fahrzeugzahl erfaßt.

Die im einzelnen mit Hilfe der Matrizendarstellung ermittelten Zahlen der Alternativen lassen eine Gesetzmäßigkeit erkennen: Wie die folgende Übersicht zeigt, handelt es sich um Binomialkoeffizienten.

$$a(st, f) = K_{n, k} = \binom{n}{k}$$

$$a(2, 1) = 4 = \binom{4}{1}$$

$$a(2, 2) = 10 = \binom{5}{2}$$

$$a(2, 3) = 20 = \binom{6}{3}$$

$$a(2, 4) = 35 = \binom{7}{4}$$

$$a(3, 1) = 9 = \binom{9}{1}$$

$$a(3, 2) = 45 = \binom{10}{2}$$

$$a(3, 3) = 165 = \binom{11}{3}$$

$$a(4, 1) = 16 = \binom{16}{1}$$

$$a(4, 2) = 136 = \binom{17}{2}$$

Durch Induktionsschluß läßt sich nun eine Funktion bilden, die die Zahl der Alternativen in Abhängigkeit von Fahrzeugs- und Stationenzahl wiedergibt. Der Zahl der Fahrzeuge (f) entspricht offenbar die Klasse der Binomialkoeffizienten (k), es gilt also $f = k$. Die Beziehung der Stationen- und Fahrzeugzahl zur Zahl der Elemente der Binomialkoeffizienten (n) läßt sich ebenfalls leicht ableiten. Bei einem Fahrzeug gilt jeweils $n = st^2$, für 2 Fahrzeuge $n = st^2 + 1$, für 3 Fahrzeuge $n = st^2 + 2$ usw. Es wird deutlich, daß folgende Beziehung gilt: $n = st^2 + f - 1$.

Die Binomialkoeffizienten lassen sich also als eine Funktion von st und f ausdrücken: $a(st, f) = \binom{st^2+f-1}{f}$

Für Binomialkoeffizienten läßt sich statt $K_{n, k} = \binom{n}{k}$ auch $K_{n, k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ (Kombination ohne Wiederholung) schreiben. Drückt man n und k in der Formel durch st

und f aus, ergibt sich:

$$\begin{aligned} K_{st^2+f-1, f} &= \frac{(st^2+f-1)!}{f!(st^2+f-1-f)!} \\ &= \frac{(st^2+f-1)!}{f!(st^2-1)} \end{aligned}$$

Mit Hilfe dieser Formel oder mit Hilfe einer Tabelle von Binomialkoeffizienten läßt sich nunmehr die Zahl der in einem Zeitpunkt möglichen Alternativen angeben, wenn die Zahlen der vollständig verbundenen Stationen und der gleichartigen Fahrzeuge bekannt sind. In der folgenden Übersicht sind wieder einige Beispiele zusammengestellt. Die Vergleichszahlen für den Fall ungleichartiger Fahrzeuge sind zusätzlich vermerkt.

$a(st, f) = \binom{st^2+f-1}{f}$		st^{2f}
$a(2, 5) = \binom{8}{5} =$	56	1.024
$a(3, 5) = \binom{13}{5} =$	1.287	59.049
$a(4, 5) = \binom{20}{5} =$	15.504	1.048.576
$a(5, 5) = \binom{29}{5} =$	118.755	9.765.625
$a(5, 2) = \binom{26}{2} =$	325	625
$a(5, 3) = \binom{27}{3} =$	2.925	78.125
$a(5, 4) = \binom{28}{4} =$	20.475	390.625
$a(5, 5) = \binom{29}{5} =$	118.755	9.765.625

Aus den Zahlenbeispielen wird ersichtlich, daß die Unterstellung gleichartiger Fahrzeuge den Rechenaufwand erheblich verringert. Mit weiter wachsender Stationen- und Fahrzeugzahl wird jedoch auch hier schließlich ein für praktische Zwecke unvertretbar hoher Rechenaufwand erforderlich.

Sind nur Gruppen von Fahrzeugen gleichartig, ist der Problemumfang kleiner als im Fall völlig verschiedenartiger Fahrzeuge und größer als im Fall gleichartiger Fahrzeuge. Der genaue Problemumfang hängt von der Größe und Anzahl der Fahrzeuggruppen ab.

d) Der Problemumfang bei gleichartigen Fahrzeugen in unvollständig verbundenen Netzen und in unverbindenden Teilnetzen

11) Der Problemumfang bei unvollständig verbundenen Netzen

Die Annahme, daß jede Station mit jeder verbunden sei, bietet den Vorteil, einfache kombinatorische Gesetzmäßigkeiten erkennen zu können. Im allgemeinen werden die Stationen jedoch nur unvollständig verbunden sein. In solchen Netzen verringert sich die Zahl der möglichen Alternativen, da nicht mehr jeder Zustand von jedem Zustand aus erreichbar ist. Der Problemumfang ist dann nicht nur von der Stationen- und Fahrzeugzahl, sondern auch von der Netzgestalt bzw. der Zahl der Verbindungen abhängig.

Da der Problemumfang nunmehr von 3 Einflußgrößen abhängt, und die Einflußgröße "Netzgestalt" nur umständlich zu quantifizieren ist, soll eine kombinatorische Gesetzmäßigkeit nicht gesucht werden. Anhand eines Beispiels läßt sich überschlägig abschätzen, wie stark der Problemumfang durch fortfallende Netzverbindungen reduziert wird.

Bei 2 gleichartigen Fahrzeugen und 4 Stationen, die durch 6 Strecken vollständig verbunden sind, läßt sich nach der Formel $a(st, f) = \binom{st^2 + f - 1}{f}$ die Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten¹⁾ in einem Zeitpunkt er-

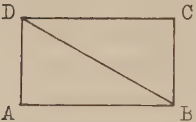
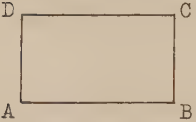
1) Entscheidungsmöglichkeit = Alternative

rechnen. Es ergeben sich:

$$a(4,2) = \binom{16+2-1}{2} = \binom{17}{2} = 136 \text{ Entscheidungsmöglichkeiten.}$$

Fallen Verbindungen fort, läßt sich die Formel nicht mehr anwenden, die Fälle müssen individuell durchgerechnet werden. Es läßt sich die folgende Übersicht aufstellen:

Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten in einem Zeitpunkt, bei 4 Stationen und 2 gleichartigen Fahrzeugen, in Abhängigkeit von der Zahl der Verbindungen

Netzgestalt	Zahl der Verbindungen	Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten
	6	136
	5	105
	4	78
	3	55

Im Beispiel nimmt die Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten prozentual etwas stärker ab als die Zahl der Verbindungen. Vermindert sich die Zahl der Verbindungen um $16 \frac{2}{3} \%$, $33 \frac{1}{3} \%$ und 50% , reduziert sich die Zahl der Entscheidungsmöglichkeiten um ca 23% , 43% und 60% der 136 Entscheidungsmöglichkeiten bei vollständig verbundenem Netz.

22) Der Problemumfang und die optimale Fahrzeugaufteilung bei unverbundenen Teilnetzen

Läßt man in dem soeben angeführten Beispiel eine weitere Verbindung fort, entstehen 2 unverbundene Gruppen von Stationen oder Teilnetze. Im Beispiel ist nur eine Trennung in zwei unverbundene Teilstrecken sinnvoll.

Die Zahl der möglichen Alternativen läßt sich nur angeben, wenn die Verteilung der Fahrzeuge auf die Teilnetze bekannt ist. Wird in dem vorliegenden Beispiel z.B. jeder Teilstrecke 1 Fahrzeug zugeteilt, sind je Teilstrecke 4, insgesamt also 8 Alternativen zu bewerten. Werden beide Fahrzeuge einer Teilstrecke zugeteilt, sind 10 Alternativen zu bewerten.¹⁾

Die einem Teilnetz zugeteilten Fahrzeuge können einen bestimmten Teilnetzgewinn erzielen. Die Summe dieser Teilnetzgewinne ergibt den insgesamt erzielbaren Gewinn oder Deckungsbeitrag der Fahrplanungsperiode. Die Gewinnmöglichkeiten je Teilnetz hängen von den dort herrschenden Nachfrageverhältnissen, den sonstigen Daten und von der Zahl der zugeteilten Fahrzeuge ab. Wegen der begrenzten Fahrzeugzahl sind die Teilnetzgewinne interdependent. Es muß deswegen angegeben werden, wie die knappen Fahrzeuge so auf die Teilnetze zu verteilen sind, daß die Summe aus den je Teilnetz erzielten Gewinnen am größten wird.

Als erstes ist dafür die Abhängigkeit der Gewinne je Teilnetz von der Zahl der je Teilnetz eingesetzten Fahrzeuge zu ermitteln. Man kann je Teilnetz mit einem Fahrzeug beginnen und wird die Berechnung einstellen, wenn durch mehr Fahrzeuge offensichtlich der Teilnetz-

1) Die Zahl der Alternativen läßt sich aus Formel
$$a(st, f) = \binom{st^2 + f - 1}{f}$$
 ableiten.

gewinn verringert, der auf eine Fahrzeugzuteilung bezogene Grenzgewinn also negativ wird. Zur Ermittlung dieser Gewinnfunktionen muß für jedes Teilnetz das im Grundmodell beschriebene Verfahren der dynamischen Programmierung mit unterschiedlichen Fahrzeugzahlen wiederholt werden. Auf diese Weise läßt sich jedem Teilnetz eine Gewinnfunktion, die die Abhängigkeit des Gewinns von der Zahl der Fahrzeugzuteilungen ausdrückt, beordnen. Je nach der Gestalt dieser Funktionen lassen sich verschiedene Verfahren, die die Gewinninterdependenzen zwischen den Teilnetzen erfassen, anwenden.

Sollten sich nur lineare Funktionen ergeben, wäre die Problemlösung banal. Dem Teilnetz, dem die Gewinnfunktion mit der größten Steigung bzw. dem größten konstanten Grenzgewinn je Fahrzeugzuteilung beigeordnet wäre, würden sämtliche Fahrzeuge zugeteilt. Solche Funktionen sind jedoch sehr unwahrscheinlich.

Eher ließe es sich denken, daß in allen Teilnetzen der Grenzgewinn für jede zusätzliche Fahrzeugzuteilung abnimmt, so daß sich je Teilnetz eine von der Abszissenachse aus gesehen konkave Funktion ergibt. In diesem Fall läßt sich die Bemühungsaufteilung¹⁾ anwenden.

Die Fahrzeugzuteilungen aller Teilnetze sind dabei nach fallenden Grenzgewinnen, beginnend mit der Fahrzeugzuteilung, die den höchsten Grenzgewinn aufweist, zu reihen. Die Reihung ist abubrechen, wenn die Zahl der eingereichten Fahrzeugzuteilungen der insgesamt vorgegebenen Zahl der Fahrzeuge entspricht. Die durch die Reihung gebildete neue Gesamtfunktion mit den Fahrzeugzuteilungen aller Teilnetze ist ebenfalls von der Abs-

1) vgl. Vazsonyi, A., a.a.O., S. 189 ff.;
Dantzig, G.B., a.a.O., S. 547 ff.

Dantzig spricht in diesem Zusammenhang von konvex-separablen Zielfunktionen.

zissenachse aus gesehen konkav, weist also die für die Lösbarkeit erforderliche Konvexität des Lösungsgebietes auf. Aus der Reihung läßt sich dann leicht die gewinnoptimale Aufteilung der Fahrzeuge auf die einzelnen Teilnetze ablesen, es brauchen nur die Teilnetz-Zugehörigkeit der in der Reihung aufgeführten Fahrzeuge festgestellt und die Fahrzeuge je Teilnetz addiert zu werden. Der optimale Gewinn für alle Teilnetze ergibt sich aus der Kumulation der Grenzgewinne der Fahrzeugzuteilungen.

Bei den komplizierten Zusammenhängen zwischen der Nachfragestruktur und den Möglichkeiten, sie durch Fahrzeugfahrten auszunutzen, ist es durchaus denkbar, daß die Funktionen je Teilnetz eine nicht-konvexe Form einnehmen. Es ist beispielsweise möglich, daß in einem Teilnetz bis zu einer gewissen Fahrzeugzahl steigende und dann fallende Grenzgewinne zu beobachten sind, die Gewinnfunktionen also einen ertragsgesetzlichen Verlauf annehmen. Die Bemühungsaufteilung versagt in diesen Fällen, da die Fahrzeugzuteilungen nicht nach fallenden Grenzgewinnen gereiht werden können, ohne unzulässige Lösungen auszuschließen. Beispielsweise könnte in offensichtlich unzulässiger Weise die 5. Fahrzeugzuteilung eines Teilnetzes eingereiht werden, bevor die dritte des gleichen Teilnetzes eingereiht wurde. An die Stelle der Bemühungsaufteilung kann in diesem Fall die mehrstufige Zuteilung treten.

Die mehrstufige Zuteilung ist ein kombinatorisches Verfahren für das sich das Problem derart in mehrere Entscheidungsstufen zerlegen lassen muß, daß die Prinzipien der dynamischen Programmierung anwendbar sind.¹⁾ Ähnlich wie bei der Bemühungsaufteilung ist eine in begrenzter Zahl n gegebene input-Art verschiedenen Prozessen zuzuteilen.

1) vgl. Vazsonyi, A., a.a.O., S. 204 ff.;
Brusberg, H., a.a.O., S. 101 ff.

Die Zielfunktion je Prozeß braucht aber nicht konvex zu sein, sie kann eine beliebige Form annehmen. Die Zielfunktion muß für jeden Prozeß lediglich angeben, mit welchem Aufwand oder Ertrag die Zuordnungen von 1 bis n Einheiten zu diesem Prozeß verbunden wären. Gesucht wird der maximale Erfolg der Zuteilungskombinationen aller Prozesse.

Die mehrstufige Zuteilung erlaubt also die Berücksichtigung beliebiger Zielfunktionen einzelner Prozesse, die über die begrenzte Menge einer input-Art verbunden sind. Die Zielfunktionen der einzelnen Prozesse müssen im übrigen aber unabhängig voneinander sein, damit sie zunächst isoliert zu ermitteln sind.

Da im vorliegenden Fall die Bewertungen je Teilnetz isoliert von den Bewertungen in den übrigen Teilnetzen möglich sind, liegt die für die Anwendbarkeit der dynamischen Programmierung wichtige additive Zielfunktion vor. Die Teilnetze bilden die Stufen, die Anzahl der je Teilnetz möglichen Fahrzeugzuteilungen die Zustände. Dies Problem kann man analog zu den bisher angewandten Lösungsschemata der dynamischen Programmierung lösen. Die je Teilnetz ermittelten Zustände der Lösung geben die Aufteilung der Fahrzeuge auf die Teilnetze an. Der Wert der Lösung ist der höchste durch sinnvolle Fahrzeugaufteilung erzielbare Gewinn aller Teilnetze.

Die Zerlegung eines zusammenhängenden Netzes in unverbundene Teilnetze zieht, trotz der optimalen Aufteilung der Fahrzeuge auf die Teilnetze, Gewinneinbußen gegenüber der Planung im Gesamtnetz nach sich. Das ist einfach deswegen der Fall, weil die tatsächlichen Verhältnisse und Freiheitsgrade der Planung durch die Zerlegung eingeschränkt werden. Der Einbuße an Isomorphie stehen jedoch die Vorteile der Lösbarkeit umfangreicher Modelle gegenüber.

Ein Gesamtnetz läßt sich auf zweierlei Weise zerlegen: einmal können Verbindungen zwischen Gruppen von Stationen getrennt werden. Es entstehen dann regional abgegrenzte Teilnetze. Ein Beispiel dafür sind die Bezirksnetze der Deutschen Bundesbahn, auf denen der Personenzugverkehr weitgehend mit den dort vorhandenen Fahrzeugen abgewickelt wird.

Zum anderen lassen sich aus einem Gesamtnetz Gruppen von Stationen auswählen, ohne daß Verbindungen unterbrochen werden. Die Stationen jeder Gruppe dürfen nur von den der Gruppe zugeteilten Fahrzeugen angefahren werden. Die Fahrzeuge benutzen also zwar das gleiche Streckennetz, nicht aber alle Stationen. Derartige Einteilungen kann man ebenfalls im Eisenbahnverkehr beobachten. Die Personenzüge fahren alle Stationen eines Netzes an, die Eilzüge nur eine Gruppe größerer Stationen und die μ -Züge nur die Gruppe der großen Stationen. Die Fahrzeuge sind in diesen Fällen allerdings nicht alle gleichartig, zumindest nicht die Personenzüge und D-Züge. Für gleichartige Fahrzeuge könnte man die günstigste Aufteilung der Fahrzeuge auf die 3 Teilnetze ermitteln, wenn der Problemumfang nicht zu groß ist.

e) Zusammenfassung

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß quantitative Modell-erweiterungen den Problemumfang sehr stark erweitern und die Modelle wegen des Rechenaufwands für praktische Zwecke grundsätzlich unbrauchbar machen. Sind die tatsächlichen Verhältnisse jedoch sehr einfach oder lassen sie sich vereinfachen, ist es denkbar, kleinere Probleme in praktikablen Modellen zu erfassen. Insbesondere für kleine, unverbundene Teilnetze mit gleichartigen Fahrzeugen ließe sich gegebenenfalls der Schritt vom Erklärungsmodell zum Entscheidungsmodell vollziehen.

3) Qualitative Modellerweiterungen

a) Berücksichtigung der losen Koppelung

Wenn die Fahrzeuge in Aggregat und Transportgefäß trennbar sind, ergeben sich für die Fahrplanung mehr Freiheitsgrade, die eine bessere Zielerfüllung ermöglichen, zugleich aber auch den Problemumfang erweitern. Grundsätzlich sind, wie bereits im ersten Teil erwähnt, drei Vorteile loser Koppelung zu nennen: Bei langen Lade- und Entladezeiten ist es möglich, nur die Gefäße für die Lade- und Löschvorgänge warten zu lassen, während die Aggregate anderweitig einzusetzen sind. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, Umladen oder Umsteigen durch Umrangieren zu ersetzen. Schließlich kann man die qualitative und quantitative Aufnahmefähigkeit eines Fahrzeuges durch An- und Abhängen von entsprechenden Gefäßen variieren.

Längere Lade- und Löschzeiten mit entsprechenden Bereitstellungszeiten sowie Umlade-, Umsteig- und Umrangierprobleme sollen im folgenden nicht untersucht werden. Diese Probleme sind meist nur in einem größeren Zusammenhang in Verbindung mit Investitions- und Standortüberlegungen für Objekt- und Fahrzeugbehandlungsanlagen sinnvoll zu analysieren. Die Auswirkungen der quantitativen Anpassung durch An- und Abkoppeln von Transportgefäßen sollen dagegen anhand eines Beispiels verdeutlicht werden.

Das Grundmodell wird ergänzt. Statt eines Fahrzeugs stehen für die Strecke A B ein Aggregat und zwei Transportgefäße, beispielsweise Güterwagen, bereit. Die zu befördernden Objektmengen, die Erträge, die Dauer der Planungsperiode und die Unterteilung in Entscheidungszeitpunkte bleiben. Aggregat und Wagen sollen zu Beginn und Ende der Periode im Depot in A stehen. Die Aufnahmefähigkeit des Fahrzeugs im ersten Beispiel und

die Aufnahmefähigkeit der beiden Wagen entsprechen sich, beide können gerade die Spitzennachfrage (40 Mengeneinheiten) aufnehmen, jeder Wagen faßt also 20 Mengeneinheiten. Der Aufwand für die Fahrt des Aggregats mit 2 Wagen entspricht dem Aufwand für die Fahrzeugfahrt im ersten Beispiel. Der Aufwand soll weiterhin unabhängig vom Beladungsausmaß sein, er ist jedoch in diesem Beispiel von der Zahl der angehängten Wagen abhängig. Führt nur das Aggregat, fällt Aufwand in Höhe von 20 DM an. Je mitgeführtem Wagen sind für erhöhten Energie- und Abnutzungsaufwand weitere 10 DM in Rechnung zu stellen. Für die Wartezeiten des Aggregats fallen 3 DM an, das Warten der Wagen ist dagegen nicht mit Aufwand verbunden.

Aus den Angaben über die Ertrags- und Aufwandsfunktion lassen sich, in Verbindung mit den Angaben über die Aufnahmefähigkeit der Transportgefäße, die für die Bewertungsvorgänge der dynamischen Programmierung erforderlichen Deckungsbeitragsfunktionen bilden.

(1) Deckungsbeitragsfunktion für Fahrten des Aggregats

$$A_i B_{i+1} = -20$$

für $i = 0$ bis 5

$$B_i A_{i+1} = -20$$

(2) Deckungsbeitragsfunktion für Fahrten des Aggregats mit einem Transportgefäß

$i =$	0	1	2	3	4	5
$A_i B_{i+1}$	-10	10	10	10	10	10
$B_i A_{i+1}$	-	10	0	-10	-10	10

(3) Deckungsbeitragsfunktion für Fahrten des Aggregats mit zwei Transportgefäßen

i =	0	1	2	3	4	5
$A_i B_{i+1}$	-20	0	0	40	20	0
$B_i A_{i+1}$	-	20	-10	-20	-20	10

(4) Deckungsbeitragsfunktion für Warten

Zahl d. wartenden Aggregate:	1	1	1	-	-
Zahl d. wartenden Transportgefäße:	-	1	2	1	2
$A_i A_{i+1}$	-3	-3	-3	0	0
$B_i B_{i+1}$	-3	-3	-3	0	0

für $i = 0$ bis 5

Bei der Ermittlung der möglichen Systemzustände in jedem Zeitpunkt soll davon ausgegangen werden, daß die Transportgefäße gleichartig sind. Für zwei Transportgefäße sind demnach anstatt 6 möglicher Standortkombinationen, nur 3 Kombinationen zu unterscheiden. Die Transportgefäße können sich alle beide in A, alle beide in B oder je eines in A und B befinden. Bei jeder der Kombinationen kann sich das Aggregat entweder in A oder in B aufhalten, so daß insgesamt 6 verschiedene Systemzustände zu unterscheiden sind, die sich symbolisch so kennzeichnen lassen:

Zustand:	Z ₁		Z ₂		Z ₃		Z ₄		Z ₅		Z ₆	
Orte	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Aggregat (Ag):	1		1		1		1		1		1	
Transportgefäße (G_1, G_2):	2		1	1		2		2	1	1		2

Um eine Fahrt durchführen zu können, muß immer ein Aggregat am Ausgangsort bereitstehen. Daraus ergibt sich, daß nicht von jedem der Zustände beliebige Fahrten und Übergänge zu anderen Zuständen möglich sind. Die Zahl der zu bewertenden Alternativen ist aus diesen Gründen kleiner als $6 \times 6 = 36$. Die möglichen Alternativen oder Übergänge von einem Zustand zum anderen sind aus der folgenden Matrix abzulesen. Ist ein Übergang möglich, ist in dem entsprechenden Feld eine 1 vermerkt, andernfalls eine 0.

	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6
Z_1	1	0	0	1	1	1
Z_2	0	1	0	1	1	0
Z_3	0	0	1	1	0	0
Z_4	1	1	1	1	0	0
Z_5	1	1	0	0	1	0
Z_6	1	0	0	0	0	1

Ausgehend von Z_1 und Z_4 sind 4, von Z_2 und Z_5 3 und von Z_3 und Z_6 2 Alternativen möglich. Insgesamt sind also 18 Alternativen in jedem Zeitpunkt zu bewerten.

Die Lösung des nunmehr vollständig beschriebenen Problems kann entweder mit Hilfe von Matrizen oder graphisch erfolgen. In den Matrizen sind lediglich die in der obigen Zulässigkeitsmatrix mit einer 1 besetzten Felder zu bewerten, im übrigen ist das für das Grundmodell angewandte Lösungsschema analog anzuwenden.

Wegen der in gedrängter Form möglichen Darstellung soll hier die graphische Lösung angegeben werden. Durch dünn ausgezogene Verbindungen sind wieder die von einem Zustand ausgehenden, jeweils besten Über-

Ortskomponente
der Zustände

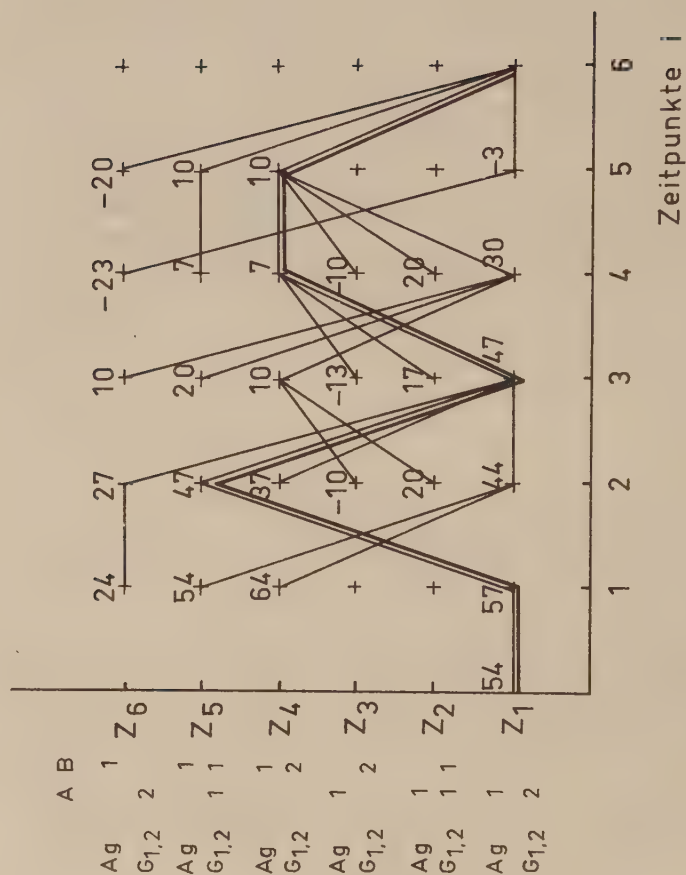


Abb. 2

gänge zum nächsten Zustand gekennzeichnet. Der daraus abzuleitende Wert des Zustandes ist jeweils vermerkt. Die dick ausgezogene Linie gibt die optimale Abfolge der Zustände und Alternativen an. Im ersten und fünften Zeitpunkt brauchen die Zustände Z_3 und Z_2 nicht bewertet zu werden, da von ihnen aus keine Übergänge vom oder zum geforderten Anfangs- oder Endzustand möglich sind (vgl. Abb. 2).

In einigen Fällen ergeben sich während des Lösungsganges Alternativen mit einem gleichen Beitrag zum Gesamtgewinn. Unter diesen Alternativen kann nach weiteren Kriterien eine Auswahl getroffen werden. Im Beispiel wurden bei gleichwertigem Warten und Aggregatfahren die Aggregatleerfahrten vermieden. Bei gleichwertigem Warten und Fahren mit Objektbeförderung wird demgegenüber die Alternative, die zur Objektbeförderung führt, vorgezogen.

Gegenüber dem Beispiel mit einem Fahrzeug liegt der 1. Abfahrtszeitpunkt der Relationen AB und BA um jeweils einen Zeitpunkt später. Der Gewinn beträgt 54 gegenüber 44 im 1. Beispiel. Wie im 1. Beispiel läßt sich ein Plan der Abfahrts- und Ankunftszeiten (Fahrplan i.e.S.) ableiten.

	von A	nach B		von B	nach A
ab A	1	3	ab B	2	5
an B	2	4	an A	3	6

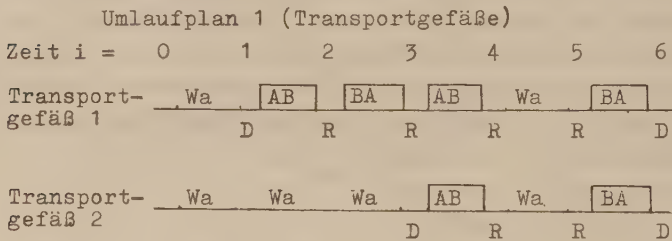
Der Laufplan des Aggregats, unter expliziter Einbeziehung der Rangier- und Wendezeiten und Zeiten für Depotfahrten, läßt sich ebenfalls aus dem Ergebnis der dynamischen Programmierung ableiten:

Laufplan (Aggregat)

Zeit i = 0	1	2	3	4	5	6
	AB	BA	BA	AB	BA	
	D	R	R	t	R	D

AB, BA = Fahrzeiten
 D = Zeiten für Fahrten vom und zum Depot
 R = Rangier- und Wendezeiten
 Wa = Wartezeiten

Für die Transportgefäße gibt es mehrere Umlaufpläne, da während des Lösungsganges der dynamischen Programmierung die Identität der Transportgefäße gleichgültig war, der Umlaufplan jedoch genau die Bewegungen und Ruhezeiten der einzelnen Transportgefäße angeben muß, um eindeutig zu sein. In unserem Fall existieren zwei gleichwertige Umlaufpläne. Der Umlaufplan 1 hat folgendes Aussehen:



Beim alternativen Umlaufplan 2 übernimmt das Transportgefäß 2 die ersten beiden Fahrten und das Transportgefäß 1 wartet bis zum Zeitpunkt 3.

b) Berücksichtigung von Kapazitätsgrenzen

11) Überblick

Man kann die Kapazität von Verkehrsbetrieben als die Fähigkeit auffassen, eine zeitlich strukturierte Nachfrage nach Verkehrsleistungen zu erfüllen. Einer beliebigen Nachfrageerfüllung stehen verschiedene Arten von Beschränkungen entgegen, die bereits im Teil 1 als Daten oder Nebenbedingungen vom Typ A genannt wurden. In einem wirklichkeitsgetreuen Modell müssen sie ex-

plizit berücksichtigt werden, da sie die zulässigen Alternativen bestimmen und eine Abweichung vom Optimum ohne Kapazitätsgrenzen verursachen können. Diese Zusammenhänge sollen hier nochmals kurz aufgegriffen werden.

Eine erste Kapazitätsgrenze ist durch die Anzahl der Fahrzeuge gegeben. Sie begrenzt die Fahrmöglichkeiten und damit die Anpassung an die Nachfragestruktur. Neben der Anzahl beeinflussen Höchst- und Mindestgeschwindigkeiten zusammen mit zeit- oder laufabhängigen Zwangsruhezeiten die Möglichkeit, fahrbereite Fahrzeuge in den Orten und Zeitpunkten der Nachfrage bereitzustellen. Weiterhin ist das Ladevermögen der Fahrzeuge von Bedeutung, es bestimmt die zu einem Zeitpunkt mit einem Fahrzeug beförderbare Menge von Transportobjekten.

Bei genügender Anzahl und Aufnahmefähigkeit bereitstellbarer Fahrzeuge können trotzdem einige Zuordnungen wegen der begrenzten Aufnahmefähigkeit ortsfester Anlagen unzulässig sein. So ist es denkbar, daß Stationen in manchen Zeitpunkten die zu ladende oder zu entladende Transportobjektmenge nicht bewältigen können, so daß aus diesem Grund eine Befriedigung der zeitlich strukturierten Nachfrage nicht möglich ist. Nicht nur die Fähigkeit zur Transportobjektbehandlung, auch die Fähigkeit zur Fahrzeugbehandlung kann bei ortsfesten Anlagen einen Engpaß darstellen. So können Stationen, Depots und Wegabschnitte in einem Zeitabschnitt nur eine begrenzte Anzahl von Fahrzeugen aufnehmen, die geringer sein kann, als die aufgrund der übrigen Größen erwünschte und mögliche Anzahl.

Weiterhin können Zahl und Eigenschaften des Fahrpersonals die Einsatzmöglichkeiten von Fahrzeugen, die auf Fahrpersonal angewiesen sind, einschränken. Die

Einsatzmöglichkeiten sind zunächst global durch die je Person zur Verfügung stehenden Einsatzstunden beschränkt. Da der Fahrpersonaleinsatz auf fahrenden Fahrzeugen erfolgt, genügt die globale Erfassung möglicher Einsatzstunden nicht. Fahrzeug- und Fahrpersonalebewegungen sind detailliert aufeinander abzustimmen, damit einerseits das Fahrpersonal rechtzeitig am Einsatzort bereitsteht und die Fahrzeugfahrten andererseits so gestaltet sind, daß die für das Fahrpersonal geltenden Nebenbedingungen eingehalten werden können.

In welcher Weise sind nun diese verschiedenen Arten von Kapazitätsgrenzen im Grundmodell berücksichtigt oder wie sind sie zusätzlich zu berücksichtigen?

22) Fahrzeugdaten

Die Fahrzeugzahl ist bereits mit dem Grundmodell vollständig erfaßt, bei einer größeren Anzahl von Fahrzeugen entstehen lediglich durch den Problemumfang Lösungsschwierigkeiten.

Die Mindest- oder Höchstgeschwindigkeiten können bei der Modellformulierung Grenzen darstellen, die die Abstimmung der Entscheidungszeitpunkte und -orte zu Entscheidungsstufen erschweren. Im Grundmodell wird bereits von festliegenden Geschwindigkeiten je Strecke ausgegangen, die innerhalb der zulässigen Grenzen liegen.

Die Berücksichtigung der Zwangsruhezeiten von Fahrzeugen erweitert den Problemumfang sehr stark.

Dies trifft insbesondere für die vom Fahrzeuglauf abhängigen Zwangsruhezeiten zu, die beispielsweise für Inspektionen nach einer bestimmten Kilometerleistung

notwendig werden. Diese laufabhängigen Zwangsruhezeiten der Fahrzeuge werden von der Länge der Fahrzeugläufe, die Länge der Fahrzeugläufe wird ihrerseits von den Zwangsruhezeitbedingungen bestimmt. Je weniger Wartezeiten in einer Alternativenabfolge vorgesehen sind, desto eher wird die Zwangsruhezeit erreicht und umgekehrt. Die Zwangsruhezeiten können in Zeiten mit starker Nachfrage und hohen Erträgen fallen, oder es sind gerade dann Leerfahrten zum Depot erforderlich, die durch andere Entscheidungen in vorhergehenden Zeitabschnitten evtl. hätten vermieden werden können. Eine Alternativenabfolge läßt sich deshalb nur als ganzes bewerten, der günstigste Zeitraum für die laufabhängige Zwangsruhezeit kann nur in Abstimmung mit allen Alternativen der Folge festgelegt werden. Die Zerlegung nach dem Prinzip der dynamischen Programmierung ist somit nicht mehr möglich, da die Zielfunktion wegen der Bewertungszusammenhänge nicht mehr additiv ist.

Bei zeitabhängigen Zwangsruhezeiten der Fahrzeuge bleibt die dynamische Programmierung dagegen anwendbar. Man kann beispielsweise für jedes Fahrzeug Ort und Zeitraum der Ruhezeit festlegen. Beginnt man das Lösungsverfahren wie bisher vom Endzustand der Periode aus, stellt das zuvor festgelegte Ruhezeitintervall einen fiktiven Ausgangszustand für das entsprechende Fahrzeug dar, auf den rekursiv zurückzuschreiten ist. Für die zeitlich vor dem Intervall liegenden Schritte der dynamischen Programmierung ist das Ruhezeitintervall dagegen ein fiktiver Endzustand, von dem aus rekursiv zum Anfangszustand der Periode geschritten wird. Das Grundmodell mit zwei Stationen und einem Fahrzeug stellte einen Spezialfall dar: Anfangs- und Endzustand der Periode stimmten mit den durch die Zwangsruhezeit des Fahrzeugs determinierten Orten und Zeiten überein, es brauchten keine fiktiven Anfangs- und Endzustände eingesetzt zu werden.

Nur wenn alle Fahrzeuge am gleichen Ort und im gleichen Zeitraum zwangsweise Pausen einschalten müssen, dürfen gleichartige Fahrzeuge als tatsächlich gleichartig angesehen werden. Sobald verschiedene Abstände bis zum Ruhezeitraum gegeben sind, müssen sonst gleiche Fahrzeuge unterschiedlich behandelt werden. Die Zahl der Zustände und Entscheidungen kann somit wegen der unterschiedlichen Ruhezeitintervalle je Fahrzeug nicht reduziert werden.

Das Ladevermögen der Fahrzeuge muß in jeder angefahrenen Station den dort aufzunehmenden Transportobjekten gegenübergestellt werden. Das Gewichts- oder Volumenladevermögen ist also dem Gewicht oder dem Volumen der zu befördernden Transportobjekte gegenüberzustellen. Ein sinnvoller Vergleich ist jedoch nur dann möglich, wenn die bereits vorher geladenen Transportobjekte, abzüglich der zu entladenden, mitberücksichtigt werden. Die Menge der vorher geladenen Transportobjekte ist von den zuvor angefahrenen Orten und den gewählten Abfahrtszeiten abhängig. Diese Orte und Zeiten sind jedoch beim rekursiven Lösungsvorgang der dynamischen Programmierung noch nicht bekannt. Die Beurteilung der in einer Station zu einem bestimmten Zeitpunkt ausnutzbaren Ladefähigkeit eines Fahrzeugs ist also ohne Kenntnis der gesamten Alternativenabfolge nicht möglich, die dynamische Programmierung nicht anwendbar. Die dynamische Programmierung ist aber anwendbar, wenn jede Ladung nur bis zu den Stationen der nächsten Entscheidungsstufe zu befördern ist, da in diesem Fall Ladevermögen und Ladungsaufkommen ohne Kenntnis vorhergehender Beladungen bei jedem Entscheidungsschritt verglichen werden kann. Ist im übrigen bereits vor der Planung abzusehen, daß das Ladevermögen nicht ausgelastet werden wird, kann diese Kapazitätsgrenze bei der Modellformulierung unberücksichtigt bleiben.

33) Daten durch ortsfeste Anlagen

Ist die in einer Station zu ladende oder entladende Transportobjektmenge wegen zu gering dimensionierter Transportobjektanlagen in einem Zeitabschnitt begrenzt, so ist bereits bei der Festlegung der Nachfrage- und der Zielfunktion nur von der zu ladenden oder entladenden Menge auszugehen. Die übrigen Mengen entfallen für die Beförderung, wenn angenommen wird, daß sich die in einem Zeitpunkt unbefriedigte Nachfrage nicht auf andere Zeitpunkte übertragen läßt.

Die begrenzte Fahrzeugaufnahmefähigkeit von Stationen, Depots und Wegabschnitten bietet die Möglichkeit, das Modell zu vereinfachen. Da alle möglichen Systemzustände und Bewegungen explizit erfaßt werden, kann auch die Verträglichkeit jedes Systemzustandes und jeder Bewegung mit der Kapazitätsbegrenzung der festen Anlagen verglichen werden. Jede Alternative ist also zunächst daraufhin zu prüfen, ob sie realisierbar ist, erst wenn diese Prüfung positiv ausfällt, ist zu bewerten. Unzulässige Zustände und Bewegungen können somit ausgeschlossen werden, der Problemumfang verringert sich, wenn die Kapazitätsprüfungen einfacher als die Bewertungen sind.

44) Fahrpersonaldaten

Da der Fahrpersonaleinsatz auf fahrenden Fahrzeugen erfolgt, wird die Länge der Einsatzzeit, nach der eine Zwangsruhezeit für das Fahrpersonal eintritt, von den vorhergehenden Fahrzeugbewegungen bestimmt. Die Fahrzeugbewegungen bestimmen auch die Orte, in denen die Fahrpersonalruhezeiten eintreten. Die begrenzenden Auswirkungen der Zwangsruhezeiten des Fahrpersonals können deswegen nur ermittelt werden, wenn zugleich die vorhergehenden Fahrzeugbewegungen bekannt sind. Um diese zeitlichen Interdependenzen

einzubeziehen, müßten alle zeitlichen und örtlichen Fahrzeug- und Fahrpersonalzuordnungen eines größeren Zeitabschnittes zu Alternativen zusammengefaßt, bewertet und verglichen werden. Mit der dynamischen Programmierung läßt sich die totale Enumeration nicht vermeiden, der Problemumfang ist derart groß, daß selbst kleinste Beispiele nicht mehr zu erfassen sind.

55) Zusammenfassung

Mit der dynamischen Programmierung läßt sich der Einfluß der begrenzten Aufnahmefähigkeit von Stationen für Fahrzeuge und Transportobjekte und der Einfluß begrenzter Wege- und Depotkapazität ohne Schwierigkeiten erfassen.

Mindest- und Höchstgeschwindigkeiten der Fahrzeuge wirken sich im Grundmodell, das nur eine Geschwindigkeitsstufe je Strecke erfaßt, nicht begrenzend aus. Die Geschwindigkeitsgrenzen können aber bei der Modellformulierung hinderlich sein.

Während sich zeitabhängige Zwangsruhezeiten der Fahrzeuge mit der dynamischen Programmierung noch erfassen lassen, versagt sie bei den laufabhängigen Ruhezeiten, da die gesamte Alternativenabfolge betrachtet werden muß. Aus dem gleichen Grund ist eine genaue Berücksichtigung der Ladefähigkeit der Fahrzeuge nicht möglich.

Ähnlich wie die laufabhängigen Zwangsruhezeiten der Fahrzeuge erfordern die indirekt auch laufabhängigen Zwangsruhezeiten des Fahrpersonals ebenfalls die Erfassung von Alternativenabfolgen, so daß die Problemzerlegung mit der dynamischen Programmierung nicht mehr möglich ist.

c) Berücksichtigung von Zielnebenbedingungen

Dem Grundmodell wurde die Gewinnmaximierung als Ziel vorgegeben. Die Zielanalyse im Teil 1 hat gezeigt, daß ein solches Ziel sowohl zu privatwirtschaftlichen als auch zu gemeinwirtschaftlichen Oberzielen eine ausreichende Komplementarität aufweist. Häufig ist das Gewinnmaximierungsziel allerdings noch durch Zielnebenbedingungen zu ergänzen.

Sind die Zielnebenbedingungen sachlich, örtlich und zeitlich genau definiert, sind sie als bereits fixierte Alternativen in das dynamische Modell einzubeziehen. Nur die übrigen Alternativen können nach dem Gewinnmaximierungsziel ausgewählt werden.

Sind die Zielnebenbedingungen weniger genau definiert, ist die unter Berücksichtigung solcher Nebenbedingungen optimale Lösung schwerer zu finden. Solange Zielnebenbedingungen einen Spielraum für die Festlegung von Alternativen lassen, müssen diejenigen Alternativen herausgefunden werden, die die Zielnebenbedingungen erfüllen und zugleich die geringste Gewinneinbuße bedingen. Schreibt eine Zielnebenbedingung beispielsweise vor, daß eine Strecke viermal am Tag zu befahren sei, und ergibt die gewinnmaximale Lösung des dynamischen Modells, daß nur 3 Fahrten erfolgen, so gibt es zahlreiche Möglichkeiten, die 3 Fahrten durch eine Kombination von 4 Fahrten zu ersetzen. Zu suchen ist die Kombination, die gegenüber der gewinnmaximalen Lösung die geringste Gewinneinbuße bewirkt. Ein exaktes Verfahren zur Bestimmung einer solchen Kombination gibt es nicht. Man kann lediglich versuchen, sich durch Probieren möglichst nahe an den zuvor ermittelten gewinnmaximalen Wert heranzutasten.

D. Zusammenfassende Beurteilung der Modelle

Da das allgemeine Fahrplanungsproblem zu vielschichtig ist, mußte es in Modellen einfacher und formaler dargestellt werden. Auf diese Weise wurde es möglich, Zusammenhänge zu zeigen und zu verdeutlichen, die sonst nur schwer oder gar nicht zu erfassen sind. Die Modelle sind insofern Erklärungsmodelle.

Daneben könnten die Modelle als Planungshilfsmittel Verwendung finden und als Entscheidungsmodell dienen. Man muß sich dabei jedoch über die wesentlichen Mängel, die die Leistungsfähigkeit der Modelle begrenzen, im klaren sein:

1) Die komplexe Problemstruktur erzwingt Schritte, die durch die Zusammenhänge zwischen den Gruppen der Aktionsparameter gehen. Meistens wird nur die Gruppe der Fahrzeugzuordnungen herausgegriffen. Die übrigen Gruppen werden einer anschließenden Planung überlassen. Da jedoch zwischen den Aktionsparametergruppen wechselseitige Beziehungen bestehen, müßte eine simultane Planung aller Aktionsparameter erfolgen; durch die sukzessive Planung wird das Optimum verfehlt.

2) Die Berücksichtigung von Zusammenhängen zwischen verschiedenen Zeitpunkten ist nur unvollkommen möglich. Mit den Zuordnungsmodellen werden zeitliche Zusammenhänge nicht erfaßt. Erfolgen ausnahmsweise Zuordnungen zu Kombinationen von Ort und Zeit, dann ist nicht die Auswahl der optimalen Kombinationen, sondern nur die Verbindung der bereits fixierten Kombinationen Gegenstand der Planung.

In einigen kombinatorischen Modellen wird der Zusammenhang zwischen 2 Fahrplanungsperioden erfaßt.¹⁾

1) vgl. Minas, J.G., Mitten, L.G., a.a.O.
Miller, R.F., a.a.O.

Weitere Perioden werden jedoch nicht berücksichtigt und Lösungsverfahren nur für sehr einfache Modellverhältnisse angegeben. Pierce berücksichtigt Zeitgrenzen für einzelne Aufträge.¹⁾ Da das Modell auf der Grundlage des travelling salesman-Problems aufbaut, läßt es sich nur auf Probleme mit Fahrzeuggrundfahrten anwenden.

Mit Hilfe von Simulationsmodellen können zeitliche Zusammenhänge nur indirekt erfaßt werden. Über jede Fahrzeugfahrt wird in einem Zeitpunkt isoliert entschieden, erst die Zusammenstellung der Ergebnisse eines Simulationslaufs zeigt die Gesamtauswirkung der Fahrzeugfahrten in der Planungsperiode. Nur unter den durch Simulationsläufe ermittelten Alternativen kann die beste ausgewählt werden.

Lediglich mit der dynamischen Programmierung lassen sich Zusammenhänge zwischen den Fahrzeugzuordnungen verschiedener Zeitpunkte erfassen. Auch die dynamische Programmierung ist aber nicht in der Lage Bewertungszusammenhänge zwischen den Alternativen verschiedener Zeitpunkte vereinfachend zu berücksichtigen.

Derartige Bewertungszusammenhänge liegen vor allem dann vor, wenn die unbefriedigte Nachfrage eines Zeitpunktes z.T. auf andere Zeitpunkte übergeht. In solchen Fällen versagen alle bekannten Lösungsverfahren.

3) Obwohl die Modelle das Fahrplanungsproblem nur unvollkommen abbilden, existieren für die Lösung einiger der Modelle nur Näherungsverfahren. Andere Modelle sind für die Erfassung größerer Probleme un-

1) vgl. Pierce, J.F., a.a.O., S. 44 ff.

brauchbar, da die Lösungsverfahren gegenüber der totalen Enumeration zu wenig Vereinfachungen ermöglichen. So müssen Zuordnungsmodelle durch Probiervverfahren ergänzt werden, um die isoliert zugeordneten Fahrzeugfahrten zu verknüpfen. Für kombinatorische Modelle werden z.T. keine exakten Verfahren angegeben; exakte Verfahren wie das Branch and Bound und die dynamische Programmierung scheitern bei der Lösung größerer Probleme am Problemumfang.

Allgemein läßt sich feststellen: Je genauer die Modelle das Fahrplanungsproblem erfassen, desto weniger sind sie vereinfachenden Lösungsverfahren, die die totale Enumeration der Alternativen vermeiden, zugänglich.

Die bei allen Planungsproblemen schwierige Frage der Datenermittlung erweitert den Problemumfang zusätzlich. Der Umfang des Problems wächst einmal außerhalb des eigentlichen Modells durch den Zeitbedarf für das Sammeln der zahlreichen Informationen, zum anderen durch die Berücksichtigung der Unsicherheit der Daten innerhalb des Modells. Die Unsicherheit kann zahlreiche Lösungen mit alternativen Annahmen über die unsicheren Daten erforderlich machen.

Es zeigt sich, daß die unmittelbare Anwendung der Modelle auf das konkrete Fahrplanungsproblem eines Verkehrsbetriebes wohl nur in Ausnahmefällen sinnvoll ist. Durch die kombinierte Anwendung mehrerer der Verfahren lassen sich jedoch wahrscheinlich noch verbesserte Anwendungsmöglichkeiten finden. Vielfältige Möglichkeiten bieten sich außerdem, wenn man auf exakte Verfahren verzichtet und versucht, durch Probiervverfahren zu einer Lösung zu kommen. Die in dieser Arbeit vorgenommene Einordnung des Fahrplanungsproblems in das betriebswirtschaftliche Begriffssystem und die Untersuchung der Problemstruktur mit Hilfe von Modellen kann die Erfassung und Beurteilung konkreter Probleme erleichtern und als Grundlage für derartige Lösungsversuche dienen.

Literaturverzeichnis

I Bücher

- Adam, D., Produktionsplanung bei Sortenfertigung, Diss.
Hamburg 1965
- Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton 1957
- Bendixen, P., Die Leistungserstellung der Güterverkehrsbetriebe, Diss. Hamburg 1966
- Bidlingmaier, J., Unternehmerziele und Unternehmerstrategien, Wiesbaden 1964
- Binder, P., Die gemeinwirtschaftlichen und betriebsfremden Belastungen der Betriebe des öffentlichen Personennahverkehrs, Berlin 1964
- Bongert, M., Deutscher Luftverkehr, Bad Godesberg 1967
- Braun, W., Die Kapazität der Güterverkehrsbetriebe, Stuttgart 1959
- Brusberg, H., Der Entwicklungsstand der Unternehmensforschung mit besonderer Berücksichtigung der Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden 1965
- Cassier, S.C., Wer bestimmt die Geschäftspolitik der Großunternehmen?, Frankfurt 1962
- Churchman, C.W., Ackoff, R.L., Arnoff, E.L.,
Operations Research, 2. Aufl., Wien, München 1964
- Dantzig, G.B., Lineare Programmierung und Erweiterungen, Berlin, Heidelberg, New York 1966
- Eichenberger, H., Ökonomische Methoden in der linearen Planungsrechnung, Hamburg, Berlin 1963
- Ellinger, T., Ablaufplanung, Stuttgart 1955
- Engels, W., Betriebswirtschaftliche Bewertungslehre im Lichte der Entscheidungstheorie, Köln, Opladen 1962
- Ford, L.R., Fulkerson, D.R., Flows in Networks, Princeton 1962
- Güfgen, G., Theorie der wirtschaftlichen Entscheidung, Tübingen 1963

- General Purpose Systems Simulator III, Introduction, IBM Application Program, o.O., 1965
- Gutenberg, E., Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 1, Die Produktion, 11. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York 1966
- Gutersohn, A., Der Eisenbahnfahrplan für den Personenverkehr, Diss. Bern 1932, Solothurn 1940
- Hahn, H., Eisenbahnbetriebslehre, Berlin 1967
- Heinen, E., Betriebswirtschaftliche Kostenlehre, Bd. 1, Begriff und Theorie der Kosten, 2. Aufl., Wiesbaden 1965
- Heinen, E., Das Zielsystem der Unternehmung, Wiesbaden 1966
- Hoss, K., Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden, Würzburg, Wien 1965
- Hudley, G., Nonlinear and Dynamic Programming, Reading (Mass.) 1964
- Illetschko, L.L., Transportbetriebswirtschaftslehre Wien, New York 1966
- Jándy, G., Optimale Transport- und Verkehrsplanung, Würzburg 1967
- Kadlec, V., Vodáček, L., Lineare Optimierung im Transportwesen, Berlin 1967
- Kern, W., Operations Research, Stuttgart 1964
- Kern, W., Optimierungsmethoden in der Ablauforganisation, Essen 1967
- Klaus, G., Begriffe für Leistungs- und Kostenanalysen im Binnenverkehr, Düsseldorf 1963
- Krömmelbein, G., Leistungsverbundenheit im Verkehrsbetrieb, Berlin 1967
- Lechner, K., Verkehrsbetriebslehre, Stuttgart 1963
- Luckow, C., Beiträge zur Ökonomik des Transportwesens unter besonderer Berücksichtigung des Vertragssystems des Eisenbahn-, Schiffs- und Kraftverkehrs, Berlin 1957

- Manne, A.S., Economic Analysis for Business Decisions,
New York, Toronto, London 1961
- Mensch, G., Ablaufplanung, Köln, Opladen 1968
- Miller, R.F., An Analysis of a Motor Freight Scheduling
Problem, Diss. Ohio State University, Columbus
(Ohio) 1962
- Nowak, P., Modellanalyse der verkehrsbetrieblichen In-
vestitionsrechnung, Diss. Hamburg 1966
- Nemhauser, G.L., Introduction to Dynamic Programming,
New York 1966
- Pierce, J.F., On the Truck Dispatching-Problem, Part I,
Cambridge, Scientific Center, Technical Report
320/2018 (unveröffentlichtes Manuskript), 1967
- Pirath, C., Die Grundlagen der Verkehrswirtschaft, 2.
Aufl., Berlin, Göttingen, Heidelberg 1949
- Potthoff, G., Verkehrsströmungslehre, Bd. 1, Berlin
1962
- Predöhl, A., Verkehrspolitik, Göttingen 1964
- Rehbein, G., Wagner, H., Grundlagen der Ökonomik des
Transport- und Nachrichtenwesens, Berlin 1967
- Sasieni, M., Yaspan, A., Friedman, L., Methoden und Pro-
bleme der Unternehmensforschung, Würzburg, Wien
1965
- Schmidt-Sudhoff, U., Unternehmerziele und unternehmeri-
sches Zielsystem, Wiesbaden 1967
- Schweitzer, M., Probleme der Ablauforganisation in
Unternehmungen, Berlin 1964
- Shapiro, D., Algorithms for the Solution of the Optimal
Cost Travelling Salesman Problem, Diss. Washington
University, St. Louis 1966
- Spranger, P.-H., Theorie des Nachrichtenverkehrs, Berlin
1961
- Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutsch-
land 1966, Hrsg.: Statistisches Bundesamt, Stutt-
gart, Mainz 1966
- Strasser, H., Zielbildung und Steuerung der Unternehmung,
Wiesbaden 1966

- Suréen, Die Gemeindeordnungen in der Bundesrepublik,
Bd. 2, Gemeindewirtschaftsrecht, Köln, Berlin,
München, Bonn 1960
- Vajda, S., Einführung in die Linearplanung und die
Theorie der Spiele, 2. Aufl., München, Wien 1966
- Vazsonyi, A., Die Planungsrechnung in Wirtschaft und
Industrie, Wien und München 1964
- Voigt, F., Verkehr, Bd. 2, 2. Hälfte: Die Entwicklung
des Verkehrsystems, Berlin 1965
- Vokuhl, P., Die Anwendung der linearen Programmierung
in Industriebetrieben, Berlin 1965
- Wentzel, J.S., Elemente der dynamischen Programmierung,
München, Wien 1966
- Witte, E., Die öffentliche Unternehmung im Interessen-
konflikt, Berlin 1966

II Beiträge in Zeitschriften und Sammelwerken

- Albach, H., Entscheidungsprozeß und Informationsfluß in der Unternehmensorganisation, in: Organisation, TFB-Handbuchreihe, Bd. 1, Hrsg.: G. Schnauffer und K. Agthe, Berlin, Baden-Baden 1961, S. 355-398
- Alewell, K., Ansätze zu einer Konzeption einer ökonomischen Absatztheorie, Sonderdruck aus: Betriebswirtschaft und Marktpolitik, Festschrift für Rudolf Seyffert, Köln und Opladen 1968, S. 4-15
- Allmann, W.P., Modèle de simulation à la calculatrice de système de transport de marchandises par chemin de fer, in: Bulletin Mensuel de l'Association internationale du Congrès des Chemins de Fer, Cybernetique et Electronique dans les Chemins de Fer 4 (1967), S. 44-67
- Balinski, M.L., Quand, R.E., On an Integer Program for a Delivery Problem, in: Operations Research 15 (1964), S. 300-304
- v. Baross, M., Das amtliche Kursbuch - der Katalog der Deutschen Bundesbahn, in: Die Bundesbahn 30 (1956), S. 325-334
- v. Baross, M., Vom Fernverbindungsteil zum Fernkursbuch, in: Die Bundesbahn 32 (1958), S. 468-473
- Belmore, M., Nemhauser, G.L., The Travelling Salesman Problem: A Survey, in: Operations Research 16 (1968), S. 538-558
- Bericht über die Deutsche Bundesbahn (DB) vom 30. Januar 1960, in: Drucksache III/1602 des Deutschen Bundestages
- Bericht über die Verzerrungen der Wettbewerbsbedingungen im binnenländischen Güterverkehr nach Art und Ausmaß und Vorschläge zu ihrer Beseitigung, in: Drucksache IV/1449 des Deutschen Bundestages

- Bidlingmaier, J., Unternehmerische Zielkonflikte und Ansätze zu ihrer Lösung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 38. Jg. (1968), S. 149-176
- Boss, J.P., Simulation des Verkehrs auf einer Autobuslinie, in: Ablauf- und Planungsforschung 2 (1961), S. 20-23
- Brettmann, E., Betriebsplanung mit Methoden der Kybernetik, in: Die Bundesbahn 42 (1968), S. 813-828
- Charnes, A., Miller, M.H., A Model for the optimal Programming of Railway Freight Train Movements, in: Management Science 3 (1957), S. 74-86
- Clarke, G., Wright, J.W., Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points, in: Operations Research 12 (1964), S. 568-581
- Chausette, G., Der Bildfahrplan, seine Entstehung, Form und Anwendung im In- und Ausland, in: Die Bundesbahn 25 (1951), S. 141-143
- Dantzig, G.B., Fulkerson, D.R., Minimizing the Number of Tankers to meet a fixed Schedule, in: Naval Research Logistics Quarterly 1 (1954), S. 217-222
- Dantzig, G.B., Ramser, J.A., The Truck Dispatching Problem, in: Management Science 6 (1959), S. 80-91
- de Graf, W.J., Das Fahrplansystem der niederländischen Eisenbahn, in: Die Bundesbahn 32 (1958), S. 744-753
- Diederich, H., Zur Theorie des Verkehrsbetriebes, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 36. Jg. (1966), Ergänzungsheft 1, S. 37-52
- Dilly, G., Der wandernde Engpaß und sein Gefolge, in: Eisenbahntechnische Rundschau 3 (1954), S. 1-11 und S. 63-80
- Dubois-Reymond, Starrer Fahrplan bei der Bundesbahn?, in: Die Bundesbahn 37 (1963)
- Fährdrich, H., Der Fahrplan als Führungsinstrument der Verkehrsbetriebe, in: Mitteilungen der österreichischen Verkehrswissenschaftlichen Gesellschaft 1965, S. 11-17

- Ferguson, A.R., Dantzig, G.B., The Allocation of Aircraft to Routes. An Example of Linear Programming under Uncertain Demand, in: Management Science 3 (1957), S. 45-73
- Ferguson, A.R., Dantzig, G.B., The Problem of Routing Aircraft, in: Aeronautical Engineering Review 14 (1955), S. 51-52
- Flood, M., The Travelling Salesman Problem, in: Operations Research 4 (1956), S. 61-83
- Freudmann, E., Simulation of a Liquid Container Distribution System, in: Operations Research 16 (1968), Suppl. 1, S. B-88 (Kurzfassung)
- Fülling, F., Zugüberholungen, in: Die Bundesbahn 32 (1958), S. 957-968
- Gaskell, T.J., Bases for Vehicle Fleet Scheduling, in: Operational Research Quarterly 18 (1967), S. 281-290
- Gavin, W.W., Crandall, H.W., John, J.B., Spellman, R.A., Applications of linear Programming in the Oil Industry, in: Management Science 3 (1957), S. 407-430
- Glück, H., Versuch zur Herstellung optimaler Laufpläne der Triebfahrzeuge auf der Großrechenanlage, in: Die Bundesbahn 40 (1966), S. 217-225
- Grochla, E., Planung, Betriebliche, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Bd. 8, Stuttgart, Tübingen Göttingen 1964, S. 314-325
- Gülicher, H., Eine Anwendung der Technik des linearen Programmierens zur Optimierung des Leerwagenumlaufs bei der Bundesbahn, in: Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft, 115. Jg. (1959), S. 54-63
- Hahn, D., Planung als Instrument der Unternehmensführung, in: Unternehmensführung auf neuen Wegen, Hrsg. R.W. Stöhr, Wiesbaden 1967, S. 191-229
- Happel, O., Sperrzeiten für die Fahrplankonstruktion, in: Eisenbahntechnische Rundschau 8 (1959), S. 79-90

- Harling, J., Simulation Techniques in Operations Research
- A Review, in: Operations Research 6 (1959), S. 307-319
- Heinze, W., Veröffentlichung und Aushang von Fahrplänen,
in: Die Bundesbahn 39 (1965), S. 112-116
- Hellmich, K., Die Reiseroute von kürzester Weglänge (Dauer),
in: Mathematik-Technik-Wirtschaft 7 (1960), S. 116-175
- Hoernke, H., Zwahlen, B., Das Problem der Diensteeinteilung von Lokomotiven, in: Unternehmensforschung 10 (1966), S. 92-100
- Hoernke, H., Zwahlen, B., Weitere Bemerkungen zum Problem der Diensteeinteilung von Lokomotiven, in: Unternehmensforschung 12 (1968), S. 71-78
- Illetschko, L.L., Verkehrsbetriebe, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Bd. 11, Stuttgart, Tübingen, Göttingen 1961, S. 111-118
- Jeschke, G., "Branching and Bounding" - eine allgemeine Methode zur Lösung kombinatorischer Probleme, in: Ablauf- und Planungsforschung 5 (1964), S. 133-155
- Klingensteiner, J., Ebner, E., Der Zugförderungsdienst im Fahrplanjahr 1966/67, in: Die Bundesbahn 40 (1966), S. 991-1005
- Koch, H., Planung, in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Bd. 3, 3. Aufl., Stuttgart 1960, Sp. 4340-4352
- Koller, H., Simulation als Methode in der Betriebswirtschaft, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 36. Jg. (1966), S. 95-110
- Kosiol, E., Modellanalyse als Grundlage unternehmerischer Entscheidungen, in: Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung, 13. Jg. (1961), S. 318-334
- Kosiol, E., Zur Problematik der Planung in der Unternehmung, in: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, 37. Jg. (1967), S. 77-96
- Lagershausen, H., Das Fahren auf elektrische Sicht, Warum und wie?, in: Eisenbahntechnische Rundschau 14 (1965), S. 221-237

- Langheinrich, H., Weickelt, H., Die Fahrzeitermittlung als Grundlage der Fahrplangestaltung im Eisenbahnwesen, in: Der operative Dienst 1958, S. 230-237
- Little, J.D.C., Murty, K.G., Sweeney, D.W., Karel, C., An Algorithm for the Travelling Salesman-Problem, in: Operations Research 10 (1963), S. 973-989
- Bösch, E.G., Optimaler Einsatz von Grubenlokomotiven, in: Ablauf- und Planungsforschung, (1962), S. 37-49
- Mac Donald-Taylor, R., Scheduling in a Transportation Network, in: Operations Research 16 (1968), Suppl. 1, S. B-91 (Kurzfassung)
- Malcolm, D.G., Bibliography on the Use of Simulation in Management Analysis, in: Operations Research 8 (1960), S. 169-173
- Meier-Ohlert, D.G., Die Berechnung von Linienfahrplänen des öffentlichen Nahverkehrs auf digitalen Rechenanlagen, in: Verkehr und Technik 1962, S. 248-250 und 269-272
- Metzger, M., Der Fahrplan, in: Die Geheimnisse der Eisenbahn, 2. Aufl., Basel 1955, S. 616-622
- Meyer, M., Zum Problem der optimalen Dienstenteilung von Lokomotiven, in: Unternehmensforschung 11 (1967), S. 119-123
- Minas, J.G., Mitten, L.G., The Hub Operations Scheduling Problem, in: Operations Research 6 (1958), S. 329-345
- Moreno, J., Anwendung der Betriebsforschung (Operations Research) auf die Dienstenteilung im Fahrdienst, in: Monatsschrift der Internationalen Eisenbahn-Kongreß-Vereinigung, 1963, S. 732-737
- O'Brien, G.G., Crane, R.R., The Scheduling of a Barge Line, in: Operations Research 7 (1959), S. 561-570
- Olson, G.A., Sorensen, E.E., Sullivan, W.J., Medium Range Scheduling Model for a Freightier Fleet, Matson Research Corporation, San Francisco (Cal) 1967 (unveröffentlichtes Manuskript)

- Ott, T., Die Fahrpläne der Deutschen Bundesbahn, in: Eisenbahnfachmann 37 (1963), S. 367-369
- Pierick, K., Lösungswege für die Steuerung und Regelung von Triebfahrzeugen, in: Eisenbahntechnische Rundschau 14 (1965), S. 265-277
- Potthoff, G., Steuerung und Zufall im Eisenbahnbetrieb, in: Wissenschaftliche Zeitschrift für Verkehrswesen 7 (1959/60), S. 97-102
- Predöhl, A., Verkehr, in: Handwörterbuch der Sozialwissenschaften, Bd. 11, Stuttgart, Tübingen, Göttingen 1961, S. 103-111
- Rao, M.R. Zions, S., Allocation of Transportation Units to Alternative Trips- A Column Generation Scheme with aot- of- kilter Subproblems, in Operations Research 16 (1968), S. 52-63
- Schneider, D., Zielvorstellungen und innberbetriebliche Lenkungspreise in privaten und öffentlichen Unternehmungen, in: Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 18. Jg. (1966), S. 260-268
- Schwarz, H., Verkehrsbetriebslehre, in: Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, Bd. 4, 3. Aufl., Stuttgart 1962, Sp. 5733-5741
- Sticht, W., Verfahren zur Bestimmung der günstigsten Umlaufpläne, in: Verkehrstechnische Woche, 31. Jg. (1937), S. 181-191
- Wanger, M.L., Rose, E., Weber, A.L., Simulation of a Maritime Shipping System, in: Operations Research 16 (1968), Suppl. 1, S. B-90 (Kurzfassung)
- Weisser, G., Die freigemeinwirtschaftlichen Unternehmungen in der Bundesrepublik Deutschland, in: Die öffentliche Wirtschaft, Jg. 14 (1965), S. 9
- Weisser, G., Die Lehre von den gemeinwirtschaftlichen Unternehmen, in: Archiv für öffentliche und freigemeinwirtschaftliche Unternehmen, Bd. 1 (1954), S. 60

Lebenslauf

Am 14. Mai 1938 wurde ich als zweites Kind des Kaufmanns Bernhard Thymm und seiner Ehefrau Helene, geb. Junker, in Leipzig geboren.

Nach der Einschulung im Herbst 1944 besuchte ich Grundschulen in Lauter (Oberhessen) und Wilhelmshaven. Im Frühjahr 1949 wechselte ich zur Max-Planck-Schule (mathematisch-naturwissenschaftliches Gymnasium) in Wilhelmshaven. Dort legte ich im Frühjahr 1958 die Reifeprüfung ab.

Im Anschluß an den Schulbesuch absolvierte ich eine zweieinhalbjährige kaufmännische Lehre bei der Olympia Werke AG in Wilhelmshaven. Im Herbst 1961 schloß ich die Lehre mit der Kaufmannsgehilfenprüfung ab.

Zum Wintersemester 1960/61 begann ich an der Universität Hamburg das Studium der Betriebswirtschaftslehre, das ich im Frühjahr 1965 in Hamburg mit der Diplomprüfung für Kaufleute beendete.

Seit dem Sommersemester 1965 bin ich bei Herrn Professor Dr. Karl Alewell an der Justus Liebig-Universität in Gießen als Verwalter einer Assistentenstelle tätig.

